



Формирование черненого алюминия методом вакуум-термического испарения для ИК-излучателей

А. М. Тарасов¹, Д. В. Новиков¹, Д. В. Горелов²,
С. С. Генералов², В. В. Амеличев²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград, г. Москва, Россия

² ФГБНУ НПК «Технологический центр», г. Зеленоград, г. Москва, Россия

Создание материалов, представляющее собой черные покрытия, работающие в ближнем и среднем ИК-диапазонах, является актуальной задачей. Слои таких материалов могут использоваться для улучшения эффективности ИК-излучателей. Одним из перспективных материалов, хорошо согласующимся с МЭМС технологией, является покрытие из черного оксида алюминия. В данной работе представлены результаты формирования слоя черного оксида алюминия методом вакуум-термического испарения, и исследования его поглощающих свойств в ИК-области спектра. Экспериментальные образцы слоев черного оксида алюминия продемонстрировали поглощение в диапазоне от 2,2 до 28 мкм на уровне 84% и показали высокую температурную стабильность до 800 °С.

Ключевые слова: вакуум-термическое испарение, черный алюминий, ИК-Фурье спектроскопия, черные покрытия

Статья получена: 10.09.2023

Статья принята: 25.09.2023

ВВЕДЕНИЕ

Материалы с низким коэффициентом отражения и высоким поглощением падающего излучения в инфракрасной (ИК) области спектра находят

Formation of Blackened Aluminium by Vacuum-Thermal Evaporation for IR Emitters

A. M. Tarasov¹, D. V. Novikov¹, D. V. Gorelov², S. S. Generalov²,
V. V. Amelichev²

¹ National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow, Russia

² Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Zelenograd, Moscow, Russia

The creation of materials, such as black coatings, operating in the near and middle IR ranges, is a task of current scientific interest. Layers of such materials can be used to improve the efficiency of IR emitters. One of the perspective materials that is well consistent with MEMS technology is a black alumina coating. This article presents the fabrication results of a black aluminum oxide layer by vacuum-thermal evaporation method, and the study of its absorption features in the IR region of the spectrum. Experimental samples of black alumina layers showed absorption in the range of 2.2 to 28 μm at 84% and showed high temperature stability up to 800 °C.

Key words: vacuum thermal evaporation, black aluminum, FTIR spectroscopy, black coatings

Article received: 10.09.2023

Article accepted: 25.09.2023

INTRODUCTION

Materials with low reflection coefficient and high absorption of incident radiation in the infrared (IR) region of the spectrum are widely used in many fields, especially in thermophotovoltaic systems [1, 2], radiation cooling systems [3], stealth technology [4], etc. Functional materials used in IR emitters are the subjects of a special interest. The emission features of such materials in the IR spectrum range are due to their heating and in such application, the



широкое применение во многих областях, особенно в термофотозлектрических системах [1, 2], системах радиационного охлаждения [3], стелс-технологии [4] и т.д. Особый интерес вызывают функциональные материалы, применяемые в ИК-излучателях. Эмиссионные свойства таких материалов в ИК- области спектра обусловлены их нагревом. В таком применении важным параметром является селективность излучаемого спектра.

Одним из интересных и перспективных материалов является черный оксид алюминия, получаемый методом термического испарения в условиях низкого вакуума.

Такая методика совместима с технологией микроэлектроники, что позволяет снизить издержки на производстве и повысить его технологичность. Методом вакуум-термического испарения (ВТИ) возможно получать слои черного алюминия на любых подложках, включая диэлектрические, без использования дополнительных подслоев. Данная особенность выгодно выделяет ВТИ в сравнении с электрохимическими методами, где необходим проводящий слой (катализатор) для формирования функциональных слоев. Помимо этого, исключаются загрязнения электролитом и внесение структурных изменений в приповерхностные слои подложки. Получаемые слои имеют высокую стабильность, низкий коэффициент отражения и высокое поглощение в ИК-области спектра.

Для повышения эффективности ИК-излучателей применяются материалы, которые имеют высокий коэффициент поглощения в требуемой области спектра. В работе [5] представлено получение слоя, эквивалентного модели излучения абсолютно черного тела. Исследователями были получены слои черной платины методом электрохимического синтеза. Черная платина обладает высоким коэффициентом поглощения в широком диапазоне длин волн, включая ИК-область спектра. Другим примером является работа [6], где демонстрируется многослойная система, состоящая из слоев Ag/ZnS/Si/Ag/Si. Такая система селективно поглощает излучение в диапазоне от 3 до 5 мкм и от 8 до 14 мкм с переизлучением в диапазоне от 5 до 8 мкм.

В данной работе приведена методика формирования слоев черного алюминия методом вакуум-термического испарения. Была получена зависимость толщины слоя от количества нанесенного материала, исследована термостабильность материала и проведены исследования зависимости

selectivity of the radiated spectrum is an important parameter.

One of the interesting and promising materials is black alumina, obtained by the method of thermal evaporation in low vacuum conditions. This technique is compatible with microelectronics technology, which reduces production costs and increases its processability. By vacuum-thermal evaporation (VTI) it is possible to obtain layers of black aluminum on any substrates, including dielectric ones, without using additional sublayers. This feature advantageously distinguishes VTI in comparison with electrochemical methods, where a conductive layer (catalyst) is needed to form functional layers. In addition, electrolyte contamination and structural changes to the near-surface layers of the substrate are excluded. In result, the layers have high stability, low reflectance, and high absorption in the IR region of the spectrum.

To increase the efficiency of IR emitters, materials should have a high absorption coefficient in the required spectrum range. This article [5] presents the production of an absolute black body. Researchers obtained layers of black platinum by electrochemical synthesis method. Black platinum has a high absorption coefficient over a wide range of wavelengths, including the IR region of the spectrum. Another example is study [6], which demonstrates a multilayer system consisting of Ag/ZnS/Si/Ag/Si layers. Such system selectively absorbs radiation in the range of 3 to 5 μm and 8 to 14 μm with re-radiation in the range of 5 to 8 μm .

In this article, we are presenting the procedure for forming layers of black aluminum by vacuum-thermal evaporation. We obtained the dependence of the layer thickness on the amount of applied material along with the material thermal stability study and the dependence of the absorption of the IR spectrum of incident radiation on the layer thickness.

METHODS OF FORMATION AND MEASUREMENT

The formation of a layer of black aluminum was carried out by vacuum-thermal evaporation (VTI) at the plant URM-3279011. Tungsten rods 10 cm long and 2 mm thick were used as an evaporator. Electrodes were fixed close to each other in water-cooled current leads. Granular aluminum with 99.99% purity was used as evaporable material. A 100 mg sample of aluminum was placed in the center of the evaporator. The formation of the black aluminum layer was carried out on a single-crystal silicon plate (100) of one-sided polishing

поглощения ИК-спектра падающего излучения от толщины слоя.

МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

Формирование слоя черного алюминия осуществлялось методом вакуум-термического испарения (ВТИ) на установке УРМ-3279011. В качестве испарителя применялись вольфрамовые стержни длиной 10 см и толщиной 2 мм. Электроды закреплялись вплотную друг к другу в водоохлаждаемые тоководы. В качестве испаряемого материала использовался гранулированный алюминий чистотой 99,99%. Навеска алюминия массой 100 мг помещалась в центр испарителя. Формирование слоя черного алюминия производилось на монокристаллическую кремниевую пластину (100) односторонней полировки со слоем SiO₂ толщиной порядка 600 нм. Подложкодержатель с образцами закреплялся над центром испарителей на расстоянии 30 см. Процесс испарения навески проводился при остаточном давлении в камере 5×10^{-2} Торр. Схема установки УРМ-3279011 представлена на рис. 1.

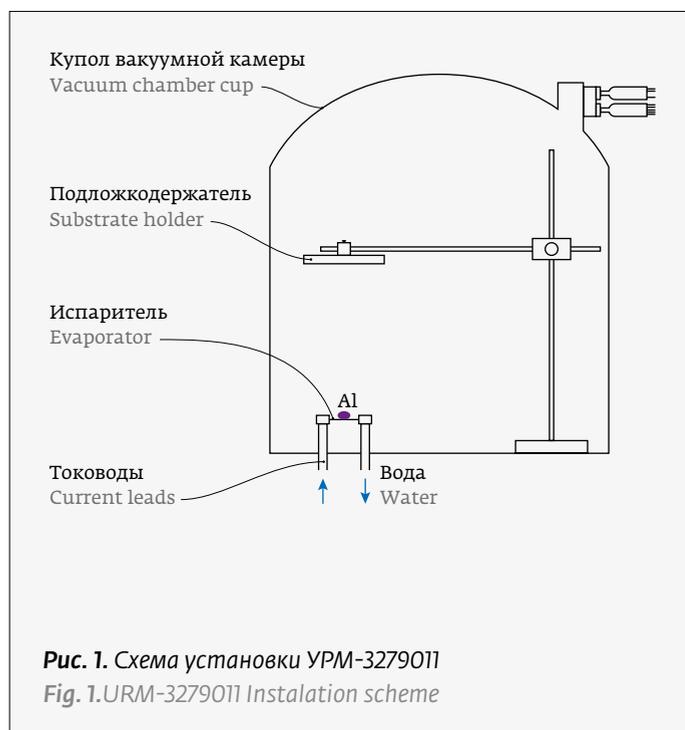
Измерение поглощения образцов проводилось на ИК-Фурье спектрометре ФСН-2201 (Инфраспек, Россия) с приставкой зеркального отражения с углом падения излучения 30° в диапазоне от 390 до 4500 см⁻¹ с шагом 0,1 см⁻¹. Для снятия одного спектра проводилось 10 измерений. Перед каждым измерением снимался спектр сравнения с использованием золотого зеркала. Золотое зеркало было выбрано в качестве эталонного зеркала для ИК-излучения.

Термическая стабильность слоев исследовалась путем нагрева в муфельной печи в воздушной атмосфере. Измерялось поглощение образцов до нагрева и после нагрева. Образцы нагревались до 100 °С со скоростью 600 °С/ч, затем температура выдерживалась в течение 10 минут и из партии изымался один образец. Далее оставшиеся образцы помещались обратно в муфельную печь и нагревались до 200 °С. Цикл повторялся до температуры 800 °С включительно.

Исследование морфологии поверхности образцов производилось на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6010plus/la (JEOL Ltd, Япония). Ток пучка составлял 21 пА, ускоряющее напряжение 5 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Исследование поглощения ИК-спектра черным алюминием было проведено на двух группах



with a SiO₂ layer with a thickness of about 600 nm. The substrate holder with samples was fixed above the center of the evaporators at a distance of 30 cm. The process of evaporation of the suspension was carried out at the residual pressure in the chamber equal to 5×10^{-2} Torr. The URM-3279011 diagram is shown in Figure 1.

Sample absorption was measured on an FTIR spectrometer FSN-2201 (Infraspeck, Russia) with a mirror image attachment with an incident angle of 30° in the range from 390 to 4500 cm⁻¹ in 0,1 cm⁻¹ increments. To obtain a single spectrum 10 measurements were taken. Before each measurement, the comparison spectrum was shot using a gold mirror. The gold mirror was chosen as the “reference” mirror for IR radiation.

The thermal stability of the layers was investigated by heating in a muffle furnace in an air atmosphere. The absorption of the samples before and after heating was measured. The samples were heated to 100 °C at a rate of 600 °C/h, then the temperature was maintained for 10 minutes and one sample was withdrawn from the batch. The remaining samples afterwards placed back in the muffle furnace and heated to 200 °C. The cycle was repeated to a temperature of 800 °C inclusive.

The surface morphology of the samples was examined using a JEOL JSM 6010plus/la (JEOL Ltd, Japan) scanning electron microscope. The beam current was 21 pA, accelerating a voltage of 5 kV.

образцов. В первой группе образцов черный алюминий формировался на полированной стороне кремниевой пластины. Во второй группе формирования слоя покрытия осуществлялось на неполированной стороне. Для каждой группы изготавливалось по 6 образцов, отличающихся количеством операций напыления. Напыления слоев проводились последовательно равными по массе порциями алюминия. С увеличением количества напылений наблюдается рост толщины слоя. При этом зависимость имеет линейный характер. На рис. 2 представлены РЭМ-снимки получаемых слоев после одного и трех процессов напылений толщиной 225 и 780 нм соответственно. На изображениях видно, что полученные слои имеют высокоразвитую морфологию поверхности.

На рис. 3 представлены спектры отражения группы образцов на гладкой стороне кремниевой пластины. Видно, что с увеличением толщины слоя растет общее среднее поглощение. Наибольшее уменьшение интенсивности отраженного ИК-спектра наблюдается после четвертого напыления в диапазоне от 1850 до 4500 cm^{-1} . Наличие пиков в диапазонах от 1300 до 1900 cm^{-1} и от 3700 до 3600 cm^{-1} можно объяснить адсорбированными газами (CO_2) и водой (ОН-группы) на развитой поверхности поглощающего слоя образцов [7]. Пики в районе 2200–2400 cm^{-1} характерны для CO_2 в воздухе.

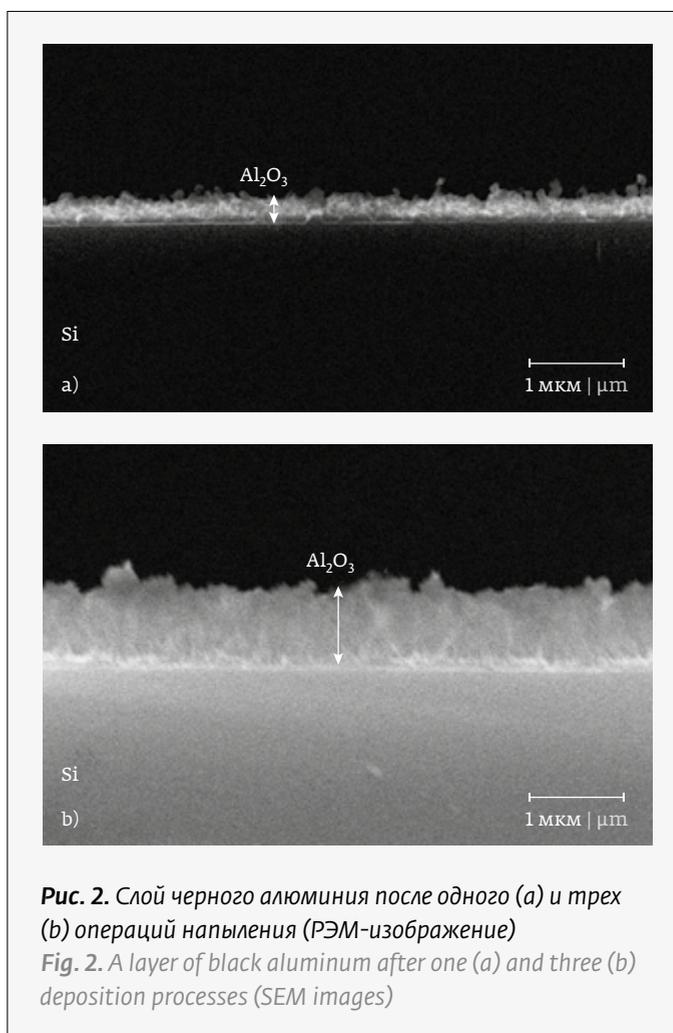


Рис. 2. Слой черного алюминия после одного (а) и трех (б) операций напыления (РЭМ-изображение)
Fig. 2. A layer of black aluminum after one (a) and three (b) deposition processes (SEM images)

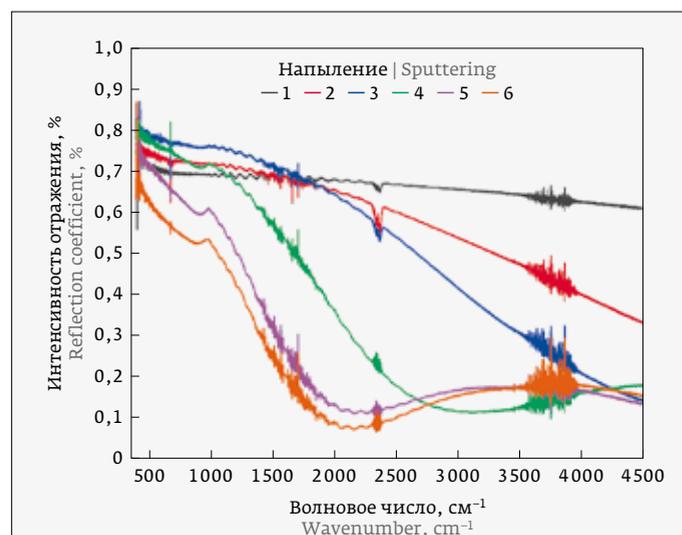


Рис. 3. Спектры поглощения черного алюминия, нанесенного на полированную сторону кремниевой пластины
Fig. 3. Absorption spectra of black aluminum deposited on the polished side of a silicon wafer

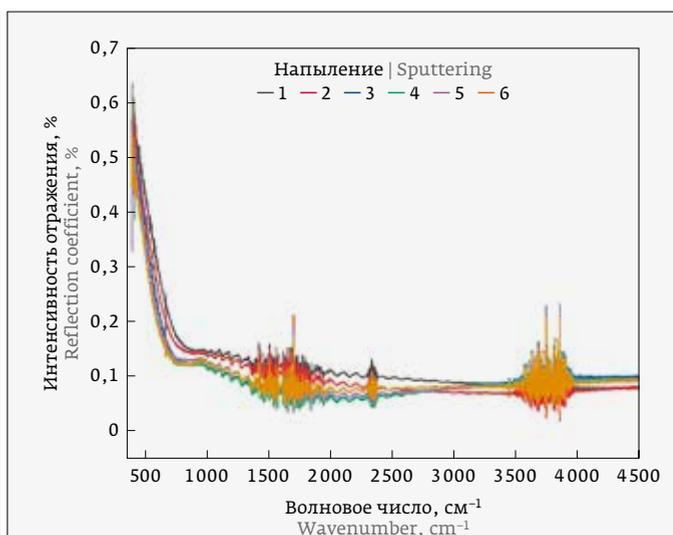


Рис. 4. Спектры поглощения черного алюминия, нанесенного на неполированную сторону кремниевой пластины
Fig. 4. Absorption spectra of black aluminum deposited on the unpolished side of a silicon wafer

Спектры отраженного ИК-излучения, полученные на черном алюминии, сформированном на неполированной поверхности кремниевой подложки, представлены на рис. 4.

Основное отличие от группы образцов на полированной подложке заключается в значительно меньшей интенсивности отраженного излучения. При этом после третьего процесса нанесения слоя черного алюминия увеличение интенсивности поглощения происходит незначительно. Стоит отметить поглощение образцами на неполированной поверхности ИК-излучения в длинноволновой области спектра. Это видно по графику зависимости отражения спектра на 800 см^{-1} от количества испарений на полированной и неполированной поверхности подложек (рис. 5).

Было исследовано изменение интенсивности отраженного ИК-излучения покрытий образцов после их нагрева. Результаты экспериментов показали, что после операции нагрева, проводимой на воздухе, образцы с покрытием из черного алюминия изменяли свой цвет после достижения температуры величины выше 400 °C . На рис. 6 продемонстрирована хорошо заметная разница в цвете двух образцов, один из которых не прошел операцию нагрева, а другой – нагревали до 800 °C . Образец, который не подвергали нагреву, имеет характерный черный цвет. Это свидетельствует о хорошем поглощении в видимом диапазоне спектра. После нагрева образца пленка черного алюминия приобретает серый цвет.

Исследование влияния температуры нагрева на изменение спектра ИК-поглощения (рис. 7) показало, что спектры поглощения незначительно изменялись при нагреве в диапазоне температурах от 100 до 300 °C . Выше 400 °C наблюдалось уменьшение поглощения в диапазоне от 1000 см^{-1}

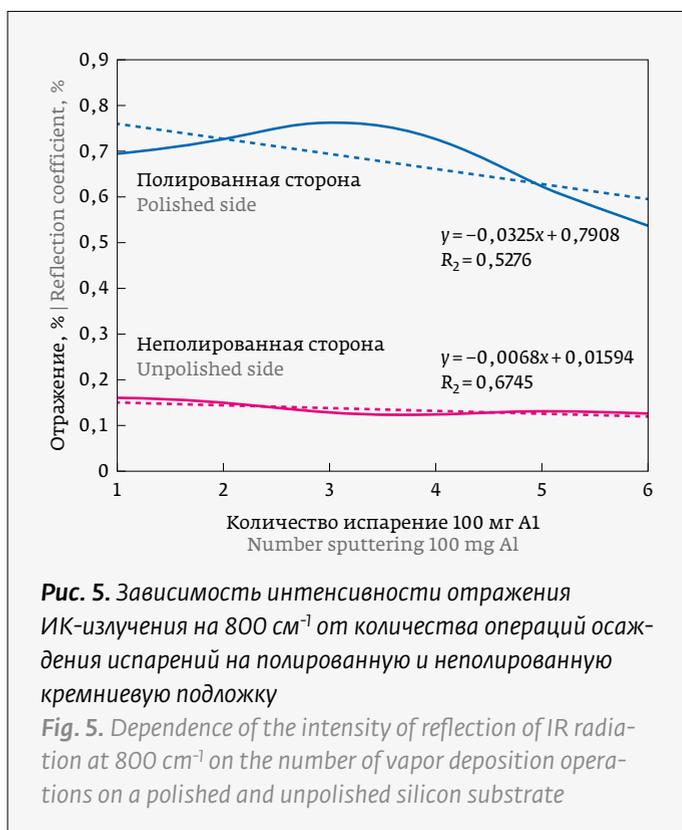


Рис. 5. Зависимость интенсивности отражения ИК-излучения на 800 см^{-1} от количества операций осаждения испарений на полированную и неполированную кремниевую подложку

Fig. 5. Dependence of the intensity of reflection of IR radiation at 800 cm^{-1} on the number of vapor deposition operations on a polished and unpolished silicon substrate

RESULTS AND DISCUSSIONS

The study of absorption of the IR spectrum with black aluminum was carried out on two groups of samples. In the first group of samples, black aluminum was formed on the polished side of a silicon wafer. In the second group, the formation of the layer was carried out on the unpolished side. For each group, 6 samples were produced, differing in the number of sputtering. Sputtering was carried out sequentially equal in weight to aluminum. As the number of sputtering increases, the thickness of the layer increases. In this case we see, that the dependence is linear dependence. Figure 2 shows the SEM images of the resulting layers after one and three sputtering 225 and 780 nm thick, respectively. The images show that the resulting layers have a highly developed surface morphology.

Figure 3 shows the reflection spectra of a series of samples on the smooth side of the silicon wafer. It can be seen that as the thickness of the layer increases, the total average absorption increases. The greatest decrease in

the total average absorption increases. The greatest decrease in

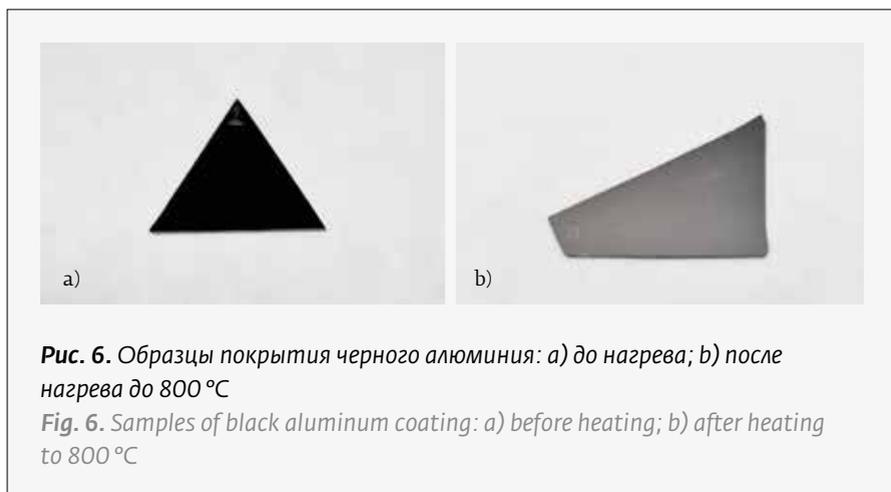


Рис. 6. Образцы покрытия черного алюминия: а) до нагрева; б) после нагрева до 800 °C

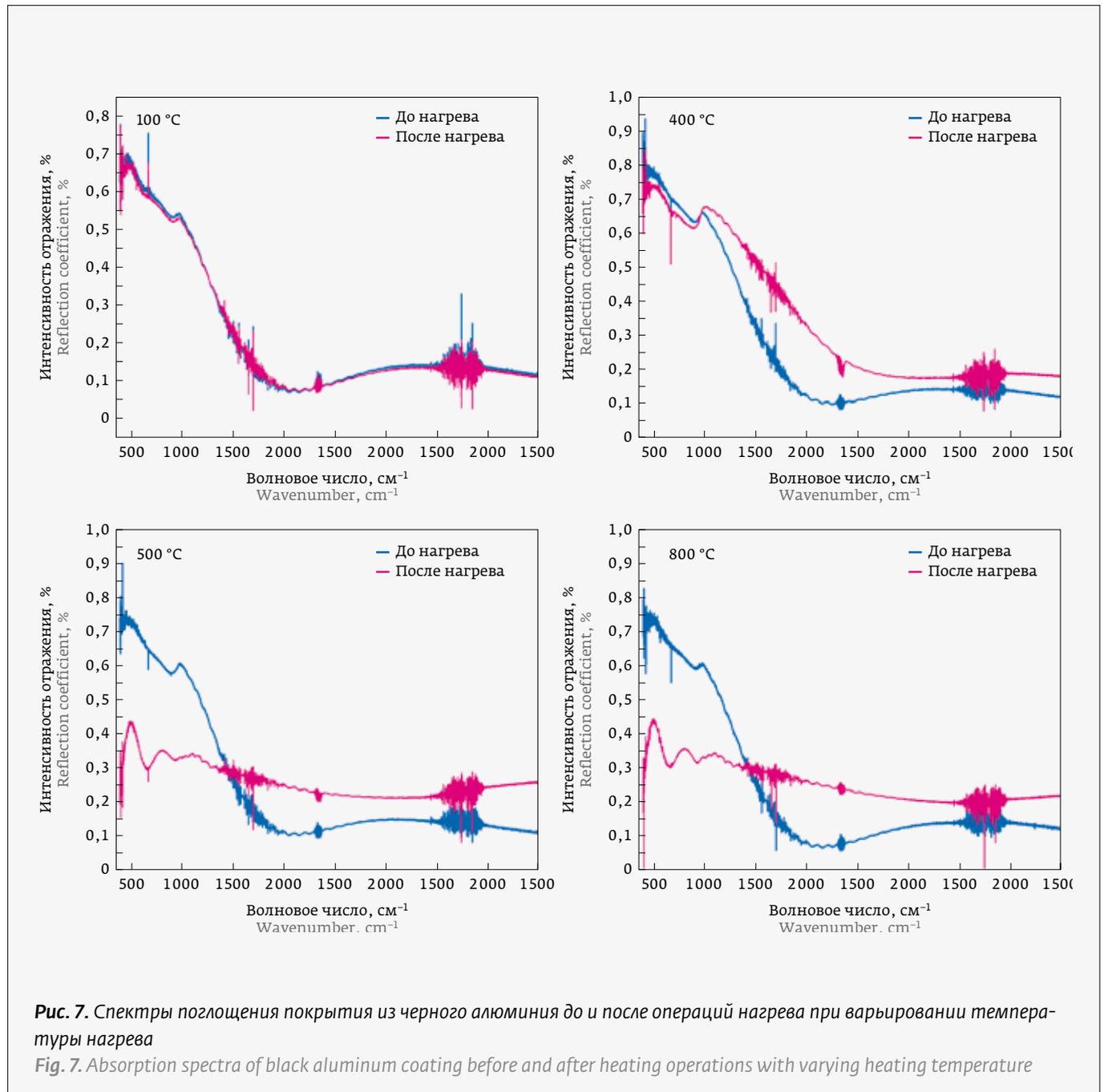
Fig. 6. Samples of black aluminum coating: a) before heating; b) after heating to 800 °C

до 2850 см^{-1} . Далее, с увеличением температуры нагрева, происходило увеличение поглощения в длинноволновой области (от 350 до 1900 см^{-1}) и увеличение отражения в ближнем ИК-спектре. Такое резкое изменение характера поглощения ИК-спектра может быть обусловлено либо появлением фазового перехода [8], либо изменением морфологии образца.

На рис. 8 представлены РЭМ-изображения слоев до и после операций нагрева до 500 °C . Как видно из рисунка, изменение морфологии поверхности

the intensity of the reflected IR spectrum is observed after the fourth sputtering in the range from 1850 to 4500 см^{-1} . The presence of peaks in the ranges from 1300 to 1900 см^{-1} and from 3700 to 3600 см^{-1} can be explained by adsorbed gases (CO_2) and water (OH-groups) on the developed surface of the absorbing layer of samples [7]. Peaks in the region of 2200 – 2400 см^{-1} are characteristic of CO_2 in the air.

The spectra of reflected IR radiation obtained on black aluminum formed on the unpolished surface of the silicon substrate are shown in Figure 4.



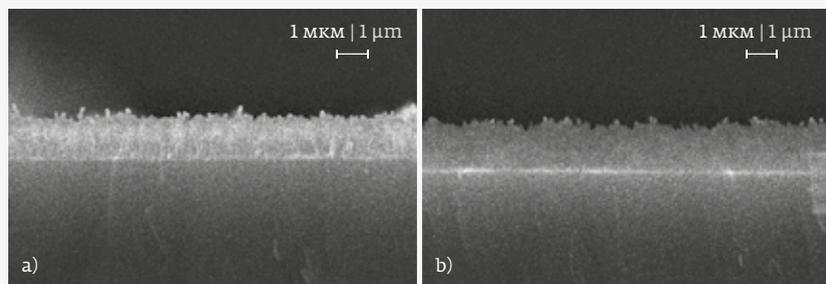


Рис. 8. Покрытие из черного алюминия: а) до операции нагрева; б) после операции нагрева (РЭМ-изображение)

Fig. 8. Black aluminum coating: a) before heating operation; b) after heating operation (SEM image)

не наблюдается, что может говорить в пользу изменения фазы оксида алюминия. При этом наличие такого эффекта может оказывать положительное влияние из-за роста поглощения в области среднего ИК-излучения.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, позволяют утверждать о наличии потенциала пригодности покрытия в виде слоя черного алюминия, полученного методом вакуум-термического испарения, в качестве эмиссионного покрытия в ИК-излучателях. Данная технология позволяет получать слои различной толщины в диапазоне от 0,2 мкм до 10 мкм в процессе формирования ИК-излучателей. Слои черного алюминия продемонстрировали достаточно хороший уровень поглощения интенсивности среднего ИК-диапазона (84%) и высокую температурную стабильность. Работа будет продолжена и будет направлена на исследование эмиссионных свойств пленок черного алюминия, сформированного на микронагревателе, изготовленного по МЭМС-технологии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения НИР FNRМ-2022-0009.

REFERENCES

1. Cai L, E J, Li J, Ding J, Luo B. A comprehensive review on combustion stabilization technologies of micro/meso-scale combustors for micro thermophotovoltaic systems: Thermal, emission, and energy conversion. *Fuel*. 2023;335:126660. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126660>.

The main difference from a series of samples on a polished substrate is the significantly lower intensity of reflected radiation. At the same time, after the third application of the black aluminum layer, the increase in absorption occurs slightly. It is important to note the absorption of samples on the unpolished surface of IR radiation in the long-wave region of the spectrum. This can be seen from the plot of the 800 cm⁻¹ spectrum reflection versus the amount of evaporation on the polished and non-polished surface of the sub-

strates (Figure 5).

After experiments with heating samples of black aluminum in air, a change in the color of the sample was observed when the temperature reached more than 400 °C. The difference in color between the unheated sample and the sample that was heated to 800 °C is clearly seen (Figure 6). The sample, which was not heated, has a characteristic black color, which indicates good absorption in the visible range of the spectrum. After the sample is heated, the black aluminum film becomes gray.

A study of the effect of the heating temperature (Figure 7) showed that the absorption spectra varied slightly at temperatures from 100 to 300 °C. Above 400 °C, a decrease in absorption was observed in the range of 1000 cm⁻¹ to 2850 cm⁻¹. Further, with increasing heating temperature, there was an increase in absorption in the long wave region (350 to 1900 cm⁻¹) and an increase in reflection in the near IR spectrum. Such a sharp change in the absorption pattern of the IR spectrum may be due to either a phase change [8] or a change in the morphology of the sample.

Figure 8 shows the SEM images of layers before and after heating to 500 °C. As can be seen from the figure, no change in surface morphology is observed, which may suggest a change in alumina phase. In this case, such a transition can have a positive effect due to an increase in absorption in the region of medium IR radiation.

CONCLUSION

In the course of the studies, the obtained results allow us to conclude that the suitability of the layer of black aluminum created by vacuum-thermal evaporation as an emission coating in IR emitters

Промышленно-энергетический форум
и специализированная выставка предприятий

ПРОМ-ЭНЕРГО VOLGA' 2023

22-24 ноября
Волгоград Арена



www.promenergovolga.ru

ВЦ ЦАРИЦЫНСКАЯ ЯРМАРКА

тел./факс: (8442) 26-50-34

www.zarexpo.ru



2. Carstens S, Meyer R, Enke D. Towards Macroporous α - Al_2O_3 —Routes, Possibilities and Limitations. *Materials*. 2020;13:1787. <https://doi.org/10.3390/ma13071787>.
3. He Z, Yan Y, Zhao T, Zhang Z, Mikulčić H. Parametric study of inserting internal spiral fins on the micro combustor performance for thermophotovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;165:112595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112595>.
4. Hu J, Li Y, Zhen Y, Chen M, Wan H. In situ FTIR and ex situ XPS/HS-LEIS study of supported Cu / Al_2O_3 and Cu / ZnO catalysts for CO_2 hydrogenation. *Chinese Journal of Catalysis*. 2021;42:367–75. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63672-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63672-5).
5. Qian M., Shi Q., Qin L., Huang J., Guo C., Liu Y. et al. Fabrication of Selective Thermal Emitter with Multilayer Films for Mid-/Low-Temperature Infrared Stealth with Radiative Cooling. *Photonics*. 2023;10:645. <https://doi.org/10.3390/photonics10060645>.
6. Stanca S. E., Hänschke F., Ihrlich A., Zieger G., Dellith J., Kessler E. et al. Chemical and Electrochemical Synthesis of Platinum Black. *Sci. Rep.* 2017;7:1074. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01040-8>.
7. Zhou Z., Huang J. Mixed design of radar/infrared stealth for advanced fighter intake and exhaust system. *Aerospace Science and Technology*. 2021;110:106490. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106490>.
8. Zhu H., Li Q., Tao C., Hong Y., Xu Z., Shen W. et al. Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling. *Nat. Commun.* 2021;12:1805. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22051-0>.

АВТОРЫ

- А. М. Тарасов, инж. ПМТ НИУ МИЭТ, Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0003-3648-8717
- Д. В. Новиков, инж. ПМТ НИУ МИЭТ, Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-9518-1208
- Д. В. Горелов, нач. НИЛ ИОМС НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-0887-9406
- С. С. Генералов, нач. НИЛ НМЭМС НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-7455-7800
- В. В. Амеличев, к. т. н., нач. МСТ НПК «Технологический центр», Москва, Зеленоград, Россия.
ORCID: 0000-0002-4204-2626

ВКЛАД АВТОРОВ

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива: А. М. Тарасов – проведение экспериментов, измерений, анализ собранных данных, обработка и обсуждение результатов; Д. В. Новиков – проведение экспериментов, измерений, анализ собранных данных, обработка и обсуждение результатов; Д. В. Горелов – организация работы, поиск и перевод иностранных источников, обсуждение результатов; С. С. Генералов – организация работы, обсуждение результатов; В. В. Амеличев – организация работы, обсуждение результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании рукописи в части вклада каждого из них в работу и согласны с полным текстом рукописи.

is possible. This technology makes it achievable to obtain layers of different thickness in the range from 0,2 μm to 10 μm during the formation of IR emitters. The layers of black aluminum showed a fairly good level of intensity absorption of the middle IR range (84%) and high temperature stability. Further research will be aimed at studying the emission properties of films of black aluminum formed on a microheater made using MEMS technology.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the implementation of the FNRМ-2022-0009 Research and Development Program.

AUTHORS

- A. M. Tarasov, engineer Institute of PMT National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-3648-8717
- D. V. Novikov, engineer Institute of PMT National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-9518-1208
- D. V. Gorelov, head of Research Laboratory "Integrated optical microsystems" Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Zelenograd, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-0887-9406
- S. S. Generalov, head of Research Laboratory "Nano and microsystem technology" Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Zelenograd, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-7455-7800
- V. V. Amelichev, Cand. of Sc. (Eng.), head of the Microstem Technology Department Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Zelenograd, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-4204-2626

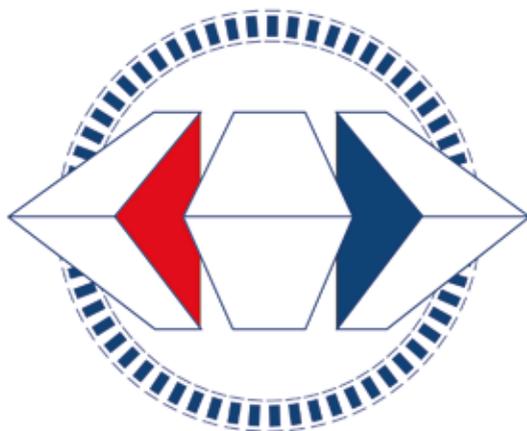
AUTHOR CONTRIBUTIONS

The article was prepared on the basis of the work of all members of the author's team: A. M. Tarasov – conducting experiments, measurements, analysis of collected data, processing and discussion of results; D. V. Novikov – conducting experiments, measurements, analysis of collected data, processing and discussion of results; D. V. Gorelov – organization of work, search and translation of foreign sources, discussion of results; S. S. Generalov – organization of work, discussion of results; V. V. Amelichev – organization of work, discussion of results

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest. All authors participated in the writing of the manuscript in agreed terms of the contribution of each of them to the research and in line with the full text of the manuscript.

**28-30
НОЯБРЯ 2023**



**РОССИЙСКИЙ
ПРОМЫШЛЕННИК**
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА



**УСТОЙЧИВОСТЬ
И РАЗВИТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

EXPOFORUM

12+