

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-31-38>
УДК 621.793



Оригинальная статья

И. М. Романов¹, С. Д. Латушкина¹, Е. Н. Щербакова², О. И. Посылкина^{1*}

¹*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь*
²*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И РЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ МИШЕНИ СОСТАВА MoSi₂ + 20 мас.% SiC

Аннотация. Методом магнетронного распыления композиционной мишени состава MoSi₂ + 20 мас.% SiC получены тонкие пленки с квазиаморфной мелкодисперсной структурой и размером кристаллитов 1–3 нм. Проведено исследование влияния температуры и продолжительности отжига на поверхностное электрическое сопротивление, структуру и фазовый состав данных пленок, которое позволило установить взаимосвязь между структурно-фазовым состоянием и величиной поверхностного сопротивления пленок. Определено, что отжиг свежесаженных пленок при температуре выше 700 °С приводит к уменьшению величины их поверхностного сопротивления в 2,5–3 раза, а при температуре термической обработки 900 °С данная характеристика стабилизируется. На основе результатов электронографического анализа и резистивных свойств пленок установлено, что изменение поверхностного электрического сопротивления обусловлено эволюцией структуры от квазиаморфной до поликристаллической. Показано, что образование стабильных фаз MoSi₂ и Mo₃Si₃ тетрагональной модификации, а также SiC гексагональной модификации после термообработки обеспечивает стабилизацию электрических свойств пленок. Установлено, что оптимальными условиями отжига допустимо считать температуру 900 °С и продолжительность термической обработки 3 ч, при которых есть вероятность стабилизации поверхностного сопротивления, структуры и фазового состава пленок. Полученные результаты могут быть использованы при создании высокоэффективных тонкопленочных ИК-излучателей, применяемых в качестве источников света в газовых микроанализаторах.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие пленки, дисилицид молибдена, карбид кремния, электрическое поверхностное сопротивление, структура пленок, фазовый состав, электронографический анализ

Благодарности: работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № T25MЭ-026).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Романов Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории вакуумно-плазменных покрытий Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, e-mail: rimigo@mail.ru; Латушкина Светлана Дмитриевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией вакуумно-плазменных покрытий Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0001-9409-5749>, e-mail: phti@tut.by; Щербакова Елена Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент, ответственный за учебно-методическую работу Приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета, e-mail: bntu@bntu.by; Посылкина Ольга Ивановна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вакуумно-плазменных покрытий Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-9104-9883>, e-mail: ola-gara@yandex.by

Вклад авторов: Романов Игорь Михайлович – обоснование концепции, нанесение покрытия на металлические образцы, проведение экспериментов, интерпретация результатов исследования; Латушкина Светлана Дмитриевна – интерпретация результатов исследования, обобщение результатов исследования; Щербакова Елена Николаевна – проведение экспериментов; Посылкина Ольга Ивановна – проведение сравнительного анализа, работа с текстом рукописи.

Для цитирования: Влияние высокотемпературного отжига на структуру, фазовый состав и резистивные свойства пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава MoSi₂ + 20 мас.% SiC / И. М. Романов, С. Д. Латушкина, Е. Н. Щербакова, О. И. Посылкина // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 1. – С. 31–38. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-31-38>

Поступила в редакцию: 08.07.2025

Доработанный вариант: 14.11.2025

Утверждена к публикации: 05.03.2026

Подписана в печать: 12.03.2026

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article***Igor M. Romanov¹, Svetlana D. Latushkina¹, Elena N. Shcherbakova², Olga I. Posylkina^{1*}**¹*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
10, Academician Kuprevich St., 220141, Minsk, Republic of Belarus*²*Belarusian National Technical University,
65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE THERMAL ANNEALING
ON THE STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND RESISTIVE PROPERTIES
OF FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING OF A TARGET
OF COMPOSITION $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$**

Abstract. Thin films with a quasi-amorphous finely dispersed structure and a crystallite size of 1–3 nm were obtained using the magnetron sputtering method of a composite target of $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$ compound. A study was conducted on the influence of temperature and duration of annealing on the surface electrical resistance, structure and phase composition of these films, which made it possible to establish a relationship between the structural-phase state and the value – of the surface resistance of the films. It was determined that annealing of freshly deposited films at a temperature above 700 °C leads to a decrease in their surface resistance by 2.5–3 times, and at a heat treatment temperature of 900 °C this characteristic is stabilized. Based on the results of electron diffraction analysis and resistive properties of the films, it was found that the change in surface electrical resistance is due to the evolution of the structure from quasi-amorphous to polycrystalline. It was shown that the formation of stable phases of MoSi_2 and Mo_5Si_3 of the tetragonal modification, as well as SiC of the hexagonal modification after heat treatment ensures stabilization of the electrical properties of the films. It was found that the a temperature of 900 °C and a heat treatment duration of 3 hours can be considered as optimal annealing modes, at which stabilization of the surface resistance, structure and phase composition of the films can be achieved. The results obtained can be used to produce highly efficient thin-film IR emitters used as light sources in gas microanalyzers.

Keywords: magnetron sputtering, thin films, molybdenum disilicide, silicon carbide, electrical surface resistance, film structure, phase composition, electron diffraction analysis

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (agreement no. T25ME-026).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Igor M. Romanov* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Vacuum Plasma Coatings at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: rimigo@mail.ru; *Svetlana D. Latushkina* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Vacuum Plasma Coatings Laboratory at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-9409-5749>, e-mail: phti@tut.by; *Elena N. Shcherbakova* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Responsible for educational and methodological work at Instrument-Making Faculty at Belarusian National Technical University, e-mail: bntu@bntu.by; *Olga I. Posylkina* – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Laboratory of Vacuum Plasma Coatings at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-9104-9883>, e-mail: ola-gapa@yandex.by

Contribution of the authors: *Igor M. Romanov* – substantiation of the concept, application of coating to metal samples, conducting experiments, interpretation of research results; *Svetlana D. Latushkina* – interpretation of research results, generalization of research results; *Elena N. Shcherbakova* – conducting experiments; *Olga I. Posylkina* – conducting a comparative analysis, working with the text of the manuscript.

For citation: Romanov I. M., Latushkina S. D., Shcherbakova E. N., Posylkina O. I. Influence of high temperature thermal annealing on the structure, phase composition and resistive properties of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 1, pp. 31–38 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-31-38>

Received: 08.07.2025

Modified: 14.11.2025

Approved for publication: 05.03.2026

Signed to the press: 12.03.2026

Введение. Поиск материалов с высокими излучающими свойствами в ИК-области спектра и заданным значением поверхностного электрического сопротивления является актуальной задачей. Использование таких материалов в тонкопленочном виде позволяет создать на их основе многослойные структуры, применяемые в оптических газовых микроанализаторах в качестве источников (или излучателей) света, работающих в ИК-диапазоне [1]. Оптические газовые микроанализаторы находят широкое применение для анализа содержания вредных газовых примесей в атмосфере вокруг различных промышленных объектов и в быту человека [2].

Эффективность работы тонкопленочных ИК-излучателей определяется излучающими свойствами материала и способностью этого устройства длительно функционировать при значениях температуры, близких к 800 °С. Высокой излучательной способностью, равной 0,8, обладают пленки силицидов некоторых металлов (Mo, W, Cr), получаемые магнетронным распылением в вакууме [3; 4]. Так, пленки силицида молибдена (MoSi_2) имеют максимальную продолжительность времени работы среди указанных соединений при длительном высокотемпературном нагреве без изменения резистивных свойств, которая тем не менее недостаточна для широкого практического использования в ИК-излучателях.

Возможным способом решения этой проблемы является формирование пленок методом магнетронного распыления при использовании композиционных мишеней состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$, что, как показали эксперименты, приводит к увеличению времени работы таких пленок по сравнению с пленками MoSi_2 [5; 6]. Вместе с тем свежесаженные пленки, полученные магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$, имеют квазиаморфную структуру с размером кристаллитов 5–10 нм. Однако при протекании через свежесаженную пленку импульсов тока, разогревающих ее до высокой температуры и приводящих к возникновению интенсивного ИК-излучения, происходит процесс неконтролируемой кристаллизации пленки и изменения ее параметров, в частности электрического сопротивления, что негативным образом сказывается на стабильной работе излучателя.

В связи с этим встает вопрос поиска технологического подхода, позволяющего стабилизировать структуру и фазовый состав пленок, а следовательно, и их удельное электрическое сопротивление. Таким подходом может быть термообработка свежесаженных квазиаморфных пленок, способствующая протеканию в них процесса собирательной рекристаллизации и перехода в более стабильное поликристаллическое состояние [7].

Цель настоящей работы – исследование влияния высокотемпературного отжига пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$, на величину их поверхностного электрического сопротивления, структуру и фазовый состав, установление взаимосвязи между структурными и электрическими характеристиками пленок, осаждаемых методом магнетронного распыления.

Методика эксперимента. Для получения пленок использовалась методика вакуумного магнетронного распыления на постоянном токе в среде аргона. Для осаждения пленок применялась мишень состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$ диаметром 46 мм, изготовленная методом импульсного прессования с использованием бризантных взрывчатых веществ смеси порошков MoSi_2 и SiC. Подложками для осаждаемых пленок служили пластины монокристаллического кремния с ориентацией (100) и диэлектрического ситалла СТ-50-1. Для определения содержания химических элементов в пленках применялся количественный анализ строения вещества по энергетическим спектрам электронов (ОЖЕ-спектроскопия), который проводился на электронном спектрометре РН-660 Perkin Elmer (США). Пространственное распределение элементов по глубине пленок определялось при пошаговом распылении поверхностного слоя образцов ионами аргона с энергией 3 кэВ.

Поверхностное сопротивление пленок измеряли четырехзондовым методом, толщину пленок определяли с использованием прибора МИИ-4 (Россия).

Перед осаждением пленок проводилась ионная обработка подложек с использованием аргонового источника Холла с энергией ионов аргона 1,0 кэВ и плотностью тока на подложке 5 мА/см². Толщина пленок после осаждения составляла 0,4 мкм.

Термическая обработка пленок осуществлялась в высокотемпературной печи на воздухе. Для защиты от окисления перед термообработкой на поверхность образцов осаждался слой нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 0,5 мкм как материал, используемый в промышленных датчиках. Для этого применялся метод низкотемпературного (350 °С) плазмохимического газофазного осаждения (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD). Образцы подвергали термообработке при $T = 450\text{--}900$ °С, затем слой Si_3N_4 удалялся химическим травлением.

Электроннографическое исследование образцов проводилось на электронографе ЭМР-102 (Россия) в режиме работы на отражение. Постоянную прибора устанавливали путем калибровки, используя образец с известными параметрами кристаллической решетки. В качестве калибровочного эталона были выбраны поликристаллические образцы окиси магния, дающие четкую кольцевую электронограмму. Для определения межплоскостных расстояний использовалась формула [8]

$$D_{hkl} \cdot d_{hkl} = 2 \cdot L \cdot \lambda = A,$$

где D_{hkl} – диаметр кольца или удвоенное расстояние от рефлекса до центра электронограммы, мкм; d_{hkl} – межплоскостное расстояние системы $h_i k_i l_i$, нм; L – эффективная длина камеры, мм; λ – длина волны электрона, Å; A – постоянная прибора. Диаметр колец измерялся прибором ИЗА-5 (Россия) с точностью ± 1 мкм. Для идентификации расшифрованных электронограмм использовали базу данных Международного центра дифракционных данных (International Centre for Diffraction Data, ICDD, <https://www.icdd.com>). Расшифровка кольцевых электронограмм от поликристаллических образцов осуществлялась следующим образом:

- 1) измеряли радиусы колец;
- 2) зная постоянную прибора A , определяли межплоскостные расстояния $d_{\text{эксп}} = A/D$, где D – экспериментальное значение межплоскостного расстояния;
- 3) идентифицировали полученные фазы путем сравнения межплоскостных расстояний ($d_{\text{эксп}}$) с теоретическими величинами межплоскостных расстояний ($d_{\text{теор}}$).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Так как достаточно мощное оптическое ИК-излучение пленки возникает при ее разогреве до температуры 750–800 °С при протекании через нее электрического тока, стабильность структуры и электрического сопротивления излучающей пленки во времени определяет надежную работу излучателя при его длительном функционировании. В настоящей работе проводились исследования влияния температуры и продолжительности отжига на поверхностное электрическое сопротивление (R), структуру и фазовый состав пленок, сформированных методом магнетронного распыления композиционной мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$.

Ступенчатое травление свеженанесенных пленок с помощью высокоэнергетического пучка ионов аргона позволило обнаружить равномерное распределение элементов по их толщине (рис. 1). Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о сохранении в осаждаемых пленках количественных пропорций между основными элементами согласно составу распыляемой мишени. Наличие примеси кислорода в составе пленок обусловлено загрязнением порошковых компонентов исходной мишени посторонними оксидами металлов.

Металлические пленки сразу после осаждения обычно имеют более высокое поверхностное сопротивление, чем после отжига при высоких температурах, что объясняется большим количеством в свеженанесенных образцах кристаллических дефектов, которые увеличивают рассеяние электронов и, соответственно, величину сопротивления. Как показали результаты экспериментов, изменение величины поверхностного электрического сопротивления пленок начинается в интервале температур 450–500 °С (рис. 2, а). При дальнейшем повышении температуры отжига пленок происходит уменьшение величины R в 2,5–3 раза по сравнению с исходным, достигая стабильного значения при $T \geq 900$ °С.

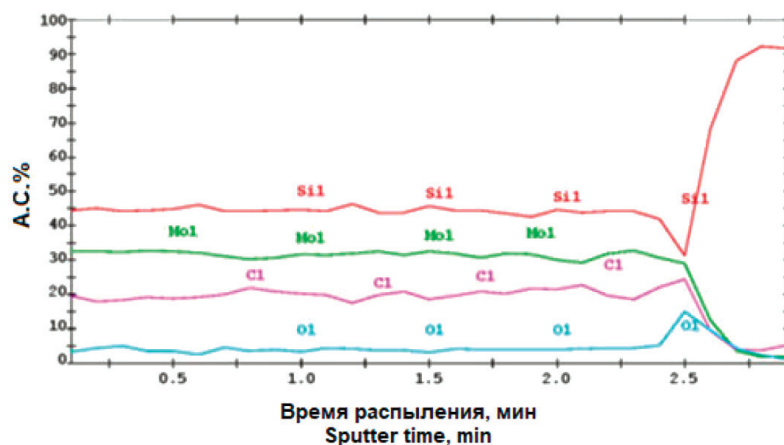


Рис. 1. Распределение элементов в пленках, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$

Fig. 1. Distribution of elements in films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$

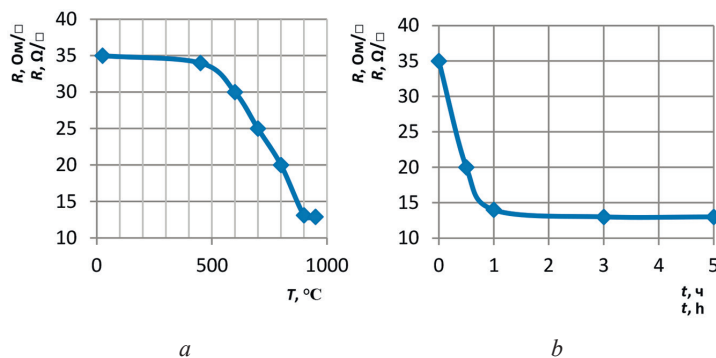


Рис. 2. Зависимость поверхностного сопротивления (R) пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20$ мас.% SiC от: a – температуры отжига (T , время отжига $t = 3$ ч); b – времени отжига (t , температура $T = 900$ °C)

Fig. 2. Dependence of the surface resistance (R) of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20$ wt.% SiC on: a – annealing temperature (T , annealing time $t = 3$ h); b – annealing time (t , temperature $T = 900$ °C)

В результате дополнительных экспериментов при температуре отжига 900 °C и варьировании его продолжительности от 1 до 5 ч установлено, что эффект стабилизации R пленок происходит уже при времени отжига $t \geq 2$ ч (рис. 2, b).

Известно, что различные свойства тонких слоев являются структурно чувствительными [9], поэтому в настоящей работе проводились исследования взаимосвязи между электрическими свойствами и структурой и фазовым составом пленок после высокотемпературного воздействия.

Исходная структура свежесоздаваемых пленок, как показал электронографический анализ, является квазиаморфной мелкодисперсной с размером кристаллитов 1–3 нм (рис. 3). Характер и вид колец на электронограмме свидетельствует о наличии в пленках помимо нанокристаллитов значительного содержания аморфных фаз.

Согласно электронографическим исследованиям термический отжиг при температуре менее 450 °C в течение 1 ч не приводит к изменению структуры пленок в сравнении с начальным состоянием. Пленки после отжига остаются аморфными. Эти данные коррелируют с результатами измерения поверхностного электрического сопротивления (R) пленок (см. рис. 2), которое также не изменяется после отжига при данной температуре.

Отжиг при повышенных температурах вызывает процессы кристаллизации, о чем свидетельствует образование сначала размытых, а затем с увеличением температуры отжига ярко выраженных дифракционных колец (рис. 4). Однако идентифицировать фазы в составе покрытий удастся только при температуре отжига 750 °C. Так, электронограмма от образца пленки, подвергнутого стационарному отжигу при температуре 750 °C в течение 1 ч, состоит из размытых дифракционных колец, принадлежащих тетрагональной модификации MoSi_2 (см. рис. 4, a , табл. 1). Таким образом, при данных режимах термообработки в тонкопленочной системе начинается образование поликристаллического дисилицида молибдена.

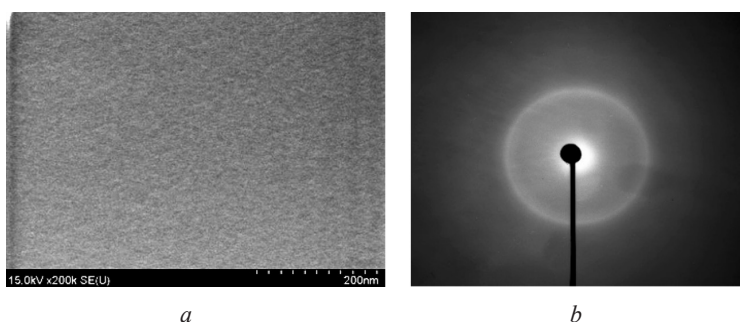


Рис. 3. Морфология поверхности (a) и электронограмма (b) свежесозданной пленки, полученной магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20$ мас.% SiC

Fig. 3. Surface morphology (a) and electron diffraction pattern (b) of a freshly deposited film obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20$ wt.% SiC

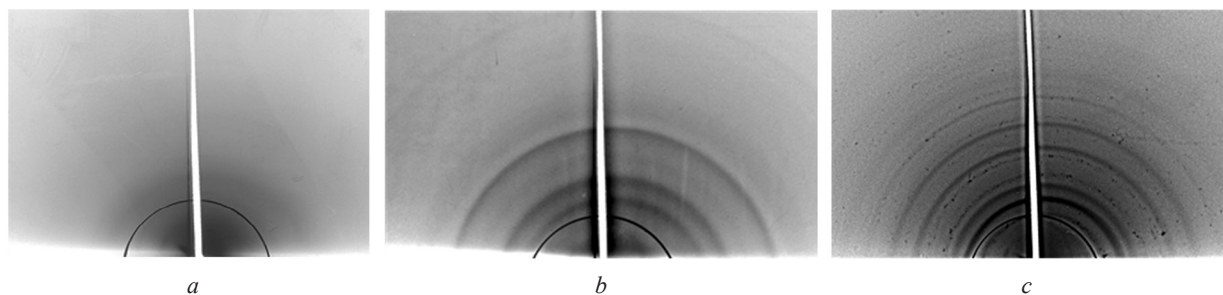


Рис. 4. Электронограммы от пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$ после последующего термического отжига в течение 1 ч при температуре 750 °C (a), 900 °C (b) и 950 °C (c)

Fig. 4. Electron diffraction patterns of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$ after subsequent thermal annealing for 1 h at a temperature 750 °C (a), 900 °C (b), and 950 °C (c)

Известно, что дисилицид молибдена существует в двух различных полиморфных кристаллических структурах: гексагональной структуре (тип C40) и тетрагональной структуре (тип C11), и только MoSi_2 в тетрагональной модификации обладает термодинамической стабильностью при высоких температурах [9]. Но уже на электронограмме от образца, подвергнутого стационарному отжигу при температуре 900 °C в течение 1 ч, видны широкие, но менее размытые дифракционные кольца, что свидетельствует о формировании фаз с поликристаллической структурой и малым размером зерен (см. рис. 4, b). Количество и интенсивность дифракционных колец на электронограмме возрастают.

Из анализа электронограмм следует, что при данных режимах отжига продолжается формирование дисилицида молибдена тетрагональной модификации, кроме того, появляются линии, указывающие на образование карбида кремния SiC гексагональной модификации. При повышении температуры отжига до 950 °C фазовый состав пленок претерпевает изменения, о чем свидетельствует появление на электронограмме дифракционных колец, указывающих на формирование силицида молибдена Mo_5Si_3 тетрагональной модификации (см. рис. 4, c). Наличие точечных рефлексов на тонких дифракционных кольцах, принадлежащих, по-видимому, SiC и MoSi_2 , указывает на ориентированный рост зерен данных фаз. Дать однозначный ответ, какому именно из названных соединений принадлежат некоторые кольца, не представляется возможным в силу того, что в базе данных ICDD существует несколько межплоскостных расстояний фаз SiC и MoSi_2 , практически равных между собой.

Таблица 1. Фазовый состав пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$ после термического отжига в течение 1 ч

Table 1. Phase composition of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$ after thermal annealing for 1 h

$d, \text{нм}$ d, nm	hkl	Температура отжига Annealing temperature		
		$T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$	$T = 950 \text{ }^\circ\text{C}$
0,392	002	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
0,295	101	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
0,236	101	–	SiC	SiC
0,235	321	–	–	Mo_5Si_3
0,225	110	MoSi_2	MoSi_2	–
0,211	411	–	–	Mo_5Si_3
0,199	222	–	–	Mo_5Si_3
0,195	112	MoSi_2	–	–
0,183	102	–	SiC	SiC
0,153	213	–	–	Mo_5Si_3
0,148	202	–	MoSi_2	MoSi_2
0,131	006	–	MoSi_2	–
0,131	112	–	SiC	–
0,125	213	–	–	MoSi_2

Влияние продолжительности отжига на процесс фазообразования в пленках было исследовано в экспериментах с серией образцов, для которых термическая обработка проводилась при фиксированной температуре 900 °C в течение разных промежутков времени (1, 3 и 5 ч). Сравнительный анализ электронограмм образцов пленки в данном эксперименте показал, что при увеличении времени термической обработки до 3 ч существенно уменьшается ширина дифракционных колец, соответствующих фазам MoSi_2 и SiC, что указывает на рост размера зерен данных фаз (рис. 5).

Кроме того, на электронограммах регистрируются дифракционные кольца, указывающие на формирование силицида молибдена Mo_5Si_3 тетра-

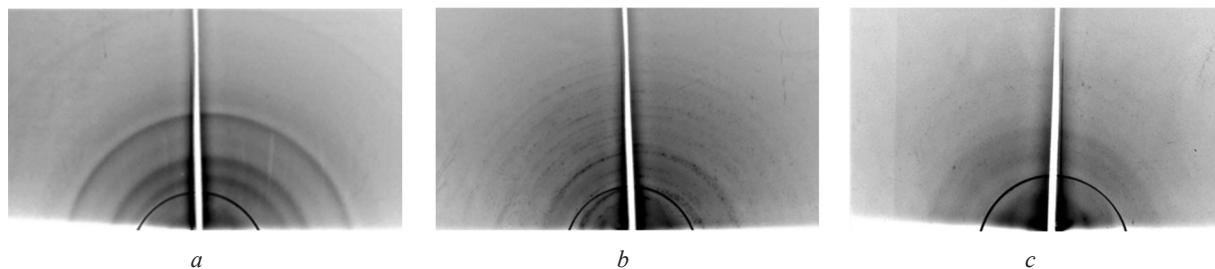


Рис. 5. Электронограммы от пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$ после стационарного отжига при $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч (a), 3 ч (b) и 5 ч (c)

Fig. 5. Electron diffraction patterns of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$ after stationary annealing at $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ for 1 h (a), 3 h (b), and 5 h (c)

гональной модификации (см. рис. 5, b, табл. 2). Также при данных режимах отжига наблюдается ориентированный рост фаз MoSi_2 , Mo_5Si_3 и SiC, о чем свидетельствует наличие точечных рефлексов на электронограмме.

Важно отметить, что увеличение времени отжига до 5 ч при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$ не приводит к изменению как фазового состава пленок (см. рис. 5, c, табл. 2), так и величины поверхностного сопротивления отожженных пленок (см. рис. 2, b).

Таким образом, проведенные исследования показывают четкую взаимосвязь между структурно-фазовым состоянием и величиной поверхностного сопротивления пленок. Формирование в составе пленок термодинамически устойчивых соединений с кристаллической структурой обеспечивает стабилизацию поверхностного сопротивления пленок.

Обобщая сведения, полученные после изучения резистивных свойств и эволюции структуры и фазообразования исследуемых пленок после отжига, можно отметить, что оптимальным режимом является отжиг при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч. При данных условиях может быть достигнута стабилизация поверхностного сопротивления, структуры и фазового состава пленок, что важно при их последующем функционировании в составе тонкопленочной структуры ИК-излучателя с импульсным режимом нагрева до температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и охлаждением до $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Заключение. Исследованы резистивные свойства и эволюция структурно-фазового состояния пленок, сформированных методом магнетронного распыления композиционных мишеней состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$, после высокотемпературного отжига. Установлено, что отжиг свежесаженных пленок при температуре $750\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению их поверхностного сопротивления в 2,5–3 раза. Показано, что стабилизация резистивных свойств пленок при температуре отжига $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч происходит за счет образования в них поликристаллической структуры с наличием стабильных фаз MoSi_2 и Mo_5Si_3 тетрагональной модификации, а также SiC гексагональной модификации.

Таблица 2. Фазовый состав пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ мас.}\% \text{ SiC}$ после стационарного отжига при $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

Table 2. Phase composition of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $\text{MoSi}_2 + 20 \text{ wt.}\% \text{ SiC}$ after stationary annealing at $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

$d, \text{ нм}$ $d, \text{ nm}$	hkl	Продолжительность отжига Annealing duration		
		$t = 1 \text{ ч}$ $t = 1 \text{ h}$	$t = 3 \text{ ч}$ $t = 3 \text{ h}$	$t = 5 \text{ ч}$ $t = 5 \text{ h}$
0,392	002	MoSi_2	–	–
0,341	220	–	Mo_5Si_3	Mo_5Si_3
0,305	310	–	Mo_5Si_3	Mo_5Si_3
0,295	101	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
0,236	101	SiC	SiC	SiC
0,225	110	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
215	420	–	Mo_5Si_3	Mo_5Si_3
0,211	411	–	Mo_5Si_3	Mo_5Si_3
0,195	112	–	MoSi_2	MoSi_2
0,183	102	SiC	SiC	SiC
0,159	200	–	MoSi_2	MoSi_2
0,154	110	–	SiC	SiC
0,148	202	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
0,131	006	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2
0,131	112	SiC	SiC	SiC
0,125	213	–	MoSi_2	MoSi_2
0,106	107	MoSi_2	MoSi_2	MoSi_2

Полученные результаты могут быть использованы при создании высокоэффективных тонкопленочных ИК-излучателей, применяемых в качестве источников света в газовых микроанализаторах.

Список использованных источников

1. Impact of environmental parameters on the emission intensity of micromachined infrared sources / O. Schulz, G. Müller, M. Lloyd, A. Ferber // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2005. – Vol. 121, № 1. – P. 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.12.010>
2. Системы контроля загазованности оптического типа / Р. М. Хамадиев, Д. Н. Федосеев, И. И. Лукица, О. Г. Зверев // *Экспозиция. Нефть. Газ*. – 2007. – № 11. – С. 43–45.
3. Изучение резистивных и излучающих свойств пленок, полученных магнетронным распылением мишеней CrSi_2 , WSi_2 и MoSi_2 , для их возможного применения в инфракрасных источниках света / С. Д. Латушкина, И. М. Романов, А. Р. Лученок, О. И. Посылкина // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 ч. / ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»*. – Мн., 2023. – Ч. 1: *Материаловедение*. – С. 256–268.
4. Chou, T. C. Pest disintegration of thin MoSi_2 films by oxidation at 500 °C / T. C. Chou, T. G. Nien // *Journal of Materials Science*. – 1994. – Vol. 29. – P. 2063–2967. <https://doi.org/10.1007/BF01117608>
5. Латушкина, С. Д. Формирование покрытий на основе дисилицида молибдена методом магнетронного распыления для применения в оптических газоанализаторах / С. Д. Латушкина, И. М. Романов, О. И. Посылкина // *Актуальные проблемы прочности / под ред. В. В. Рубаника*. – Молодечно: Типография «Победа», 2020. – С. 144–155.
6. Влияние технологических факторов на поверхностное сопротивление пленок, полученных магнетронным распылением мишени состава $(\text{MoSi}_2 + 20\%\text{SiC})$ / И. М. Романов, С. Д. Латушкина, А. Р. Лученок, О. И. Посылкина // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 ч. / ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»*. – Мн., 2024. – Ч. 2: *Обработка металлов давлением*. – С. 202–211.
7. Северденко, В. П. Структура тонких металлических пленок / В. П. Северденко, Э. И. Точицкий. – Мн.: Наука и техника, 1968. – 209 с.
8. Эндрюс, К. Электронограммы и их интерпретация / К. Эндрюс, Д. Дайсон, С. Киоун; пер. с англ. М. П. Усикова; под ред. Л. Г. Орлова. – М.: Мир, 1971. – 256 с.
9. Chou, T. C. Phase transformation and mechanical properties of thin MoSi_2 films produced by sputter deposition / T. C. Chou, T. G. Nien // *Thin Solid Films*. – 1992. – Vol. 214, iss. 1. – P. 48–57. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(92\)90454-J](https://doi.org/10.1016/0040-6090(92)90454-J)

References

1. Schulz O., Müller G., Lloyd M., Ferber A. Impact of environmental parameters on the emission intensity of micro-machined infrared sources. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 121, no. 1, pp. 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.12.010>
2. Khamadiev P. M., Fedoseev D. N., Lukitsa I. I., Zverev O. G. Optical gas contamination monitoring systems. *Ekspozitsiya. Neft'. Gaz*, 2007, no. 11, pp. 43–45 (in Russian).
3. Latushkina S. D., Romanov I. M., Luchenok A. R., Posylkina O. I. Study of resistive and emitting properties of films obtained by magnetron sputtering of CrSi_2 , WSi_2 , MoSi_2 targets for their possible use in infrared light sources. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. Ch. 1: Materialovedenie* [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing. Part 1: Materials Sciences and Engineering]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2023, pp. 256–268 (in Russian).
4. Chou T. C., Nien T. G. Pest disintegration of thin MoSi_2 films by oxidation at 500 °C. *Journal of Materials Science*, 1994, vol. 29, pp. 2063–2967. <https://doi.org/10.1007/BF01117608>
5. Latushkina S. D., Romanov I. M., Posylkina O. I. Formation of coatings based on molybdenum disilicide by magnetron sputtering for use in optical gas analyzers. Rubanik V. V. (ed.). *Actual Problems of Strength*. Molodechno, Printing House “Pobeda”, 2020, pp. 144–155 (in Russian).
6. Romanov I. M., Latushkina S. D., Luchenok A. R., Posylkina O. I. Influence of technological factors on the surface resistance of films obtained by magnetron sputtering of a target of composition $(\text{MoSi}_2 + 20\% \text{SiC})$. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. Ch. 2: Obrabotka metallov davleniem* [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing. Part 2: Metal Forming]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2024, pp. 202–211 (in Russian).
7. Severdenko V. P., Tochitskii E. I. *Structure of Thin Metal Films*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 209 p. (in Russian).
8. Andrews K. W., Dyson D. H., Keown S. R. *Interpretation of Electron Diffraction Patterns*. Springer New York, 2013. XI, 188 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6475-5>
9. Chou T. C., Nien T. G. Phase transformation and mechanical properties of thin MoSi_2 films produced by sputter deposition. *Thin Solid Films*, 1992, vol. 214, iss. 1, pp. 48–57. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(92\)90454-J](https://doi.org/10.1016/0040-6090(92)90454-J)