

Исследование состава пленок моносulfида самария, полученных электронно-лучевым нагревом

© Е.Б. Баскаков, В.И. Стрелов

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН,
119333 Москва, Россия
e-mail: baskakov.ras@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 июля 2023 г.

В окончательной редакции 26 сентября 2023 г.

Принято к публикации 26 сентября 2023 г.

Методом энергодисперсионной спектроскопии исследован элементный состав тонких пленок, полученных электронно-лучевым нагревом объемных образцов SmS с различным соотношением элементов 1Sm:1S, 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S. На примере объемного образца состава 1.15Sm:1S проведен анализ его элементного состава до и после распыления на подложку. По данным микроанализа установлено изменение содержания элементов и произведена возможная оценка изменения фазового состава в распыляемом материале. Показано, что в составе полученных тонких пленок содержится избыточное содержание Sm. Предложена методика определения неоднородности состава по глубине для пленок SmS, в рамках которой с использованием двухпоточковой модели транспорта заряженных частиц рассчитана зависимость пробега пучка моноэнергетических электронов от первичной энергии электронов в SmS для энергий до 30 keV.

Ключевые слова: электронно-лучевой нагрев, моносulfид самария, рентгено-спектральный микроанализ, пробег пучка моноэнергетических электронов в веществе.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56500.182-23

Введение

Моносulfид самария (SmS) относится к группе халькогенидов редкоземельных элементов, интерес к которым у исследователей существует давно благодаря их свойствам [1,2], существенным в различных применениях. В частности, SmS отличается низким давлением изоструктурного фазового перехода металл-полупроводник, а именно 0.65 GPa при 300 K [3], высокой термической стабильностью с температурой плавления порядка 2475 K [4], значительным термоЭДС ($\alpha \approx 170\text{--}350 \mu\text{V/K}$ [4–6]) и электропроводностью порядка $500 \Omega^{-1}/\text{cm}$ (при $T = 300 \text{ K}$) для образцов, близких к стехиометрии [4], большими величинами пьезо- и тензорезистивного эффектов (коэффициент тензочувствительности $K \sim 40\text{--}50$ для поликристаллических пленок, $K \leq 260$ для монокристаллов, коэффициент пьезосопротивления при гидростатическом сжатии $\pi g \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$) [7,8]. Кроме того, SmS, как и ряд некоторых полупроводников [9,10], обладает весьма перспективным свойством — термольтваическим эффектом [11], который заключается в возможности генерации электрического тока при нагреве без принудительного создания градиента температуры, что было продемонстрировано в ряде работ [12–14].

Особое внимание к термольтваическому эффекту в SmS вызвано величинами генерируемого напряжения. При нагреве до 400–500 K без создания внешних температурных градиентов величина генерируемого напря-

жения достигала ~ 2.5 и $\sim 4.5 \text{ V}$ для монокристаллических образцов и тонких пленок соответственно [15]. Помимо высоких значений термоЭДС тонкие пленки вызывают интерес возможностью создания многослойных структур [16] на основе SmS для увеличения генерируемого напряжения. Среди методов формирования тонких пленок SmS в основном используется магнетронное распыление [12,17], взрывное распыление [18], ионно-лучевое испарение [19] и импульсное лазерное осаждение [20]. В работе [21] для получения тонких пленок SmS был использован метод электронно-лучевого нагрева или испарения, где материалом мишени служит металлический Sm, который распыляется в атмосфере H_2S (реактивное распыление). Однако, поскольку сам метод электронно-лучевого нагрева позволяет распылять тугоплавкие металлы и соединения, возможность его применения для распыления SmS с целью получения тонких пленок SmS с заданным составом без участия токсичного H_2S вызывает интерес.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности получения тонких пленок SmS электронно-лучевым нагревом из объемных образцов SmS, а также определение особенностей состава полученных пленок SmS методом энергодисперсионной спектроскопии. Анализ полученных пленок проводился с помощью электронной микроскопии, хорошо зарекомендовавшей себя на предыдущих этапах исследований тонкопленочных покрытий из моносulfида самария, полученных магнетронным напылением [22,23].

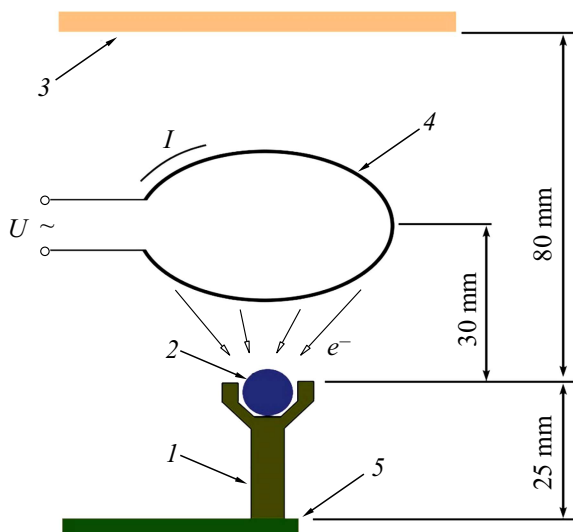


Рис. 1. Система использованного электронно-лучевого нагрева: 1 — графитовый тигель, 2 — гранула SmS, 3 — подложка, 4 — термокатод, 5 — крепление/контакт тигля.

1. Материалы и методы

Объемный материал SmS, использованный для распыления методом электронно-лучевого нагрева, представлял собой три сферические гранулы диаметром 5 mm различного состава: 1Sm:1S, 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S, которые были получены методом ампульного синтеза из элементов Sm и S [24]. Соотношение Sm и S в гранулах задавалось разной пропорцией исходных веществ, участвующих в синтезе SmS. Создание избыточного содержания Sm в составе исходного материала связано с необходимостью повышения концентрации примесных междоузельных ионов Sm^{2+} в напыляемых пленках, что требуется для повышения эффективности их термо-ЭДС [11]. Количественные ограничения содержания Sm в составе образцов обусловлены характерной областью гомогенности SmS, которая распространяется до 3.5 at.% избытка Sm [3], что соответствует соотношению исходных элементов: 1.15Sm:1S.

Распыление объемных образцов SmS производилось на подложки из ситалла Ст50 с использованием графитового тигля на установке вакуумного напыления ВУП-5 с предварительной откачкой вакуумной камеры до давления $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ Pa. Схема использованной при проведении экспериментов системы электронно-лучевого нагрева представлена на рис. 1.

Процесс распыления для каждого образца SmS различного фазового состава происходил следующим образом. Материал SmS 2 (рис. 1) помещался в графитовый тигель 1. Между контактами термокатода 4 устанавливался рабочий ток распыления до 70 mA. Между контактом тигля 5 и катодом 4 устанавливалось постоянное напряжение порядка 4 kV, которое ускоряло электроны, испускаемые термокатодом. При бомбардировке электронами поверхности объемных образцов SmS проис-

ходил их разогрев с дальнейшим распылением гранул SmS на подложку 3 в течение 10 min. Расстояние между подложкой и распыляемым материалом SmS составляло порядка 80 mm.

Определение элементного состава объемного материала SmS до и после распыления и тонких пленок производилось с помощью микроанализа методом энергодисперсионной спектроскопии с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Jeol JCM-6000 PLUS, укомплектованного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром. Каждая полученная пленка SmS исследовалась в трех точках в области, которая находилась над центром тигля в процессе распыления. В полученных данных о составе отражены средние значения атомных долей для каждого элемента.

При определении величины пробега пучка моноэнергетических электронов в веществе (R_e) при нормальном падении частиц на поверхность образца в SmS использовалась двухпоточная модель транспорта заряженных частиц в конденсированном веществе при многократном рассеянии [25], которая учитывает упругое и неупругое рассеяние электронов. В случае с SmS при использовании невысокого ускоряющего напряжения $E_0 < 30$ keV выражение для R_e , [μm], можно привести к следующему виду:

$$R_e = E_0^2 (4\pi q^4 n_0 Z \ln(E_0^2/C_M^2))^{-1}, \quad (1)$$

где E_0 — энергия пучка электронов, [keV]; q — заряд электрона, [C]; n_0 — число атомов в единице объема вещества; Z — средний атомный номер; C_M — универсальная константа, равная 790 eV.

2. Результаты и их обсуждение

Принцип электронно-лучевого нагрева состоит в том, что кинетическая энергия потока ускоренных электронов при бомбардировке ими поверхности вещества превращается в тепловую энергию, в результате чего вещество нагревается до температуры испарения [26,27], однако при этом состав получаемых пленок может отличаться от состава исходного (распыляемого) материала [28]. При использовании ускоряющего напряжения ~ 4 kV предполагалось, что интенсивное осаждение пленки SmS однородного состава возможно в случае его конгруэнтного испарения [29] при достижении температуры плавления SmS 2475 K. Для проверки этого предположения на примере исходного образца состава 1.15Sm:1S был проведен элементный анализ его до и после распыления. Исследование проводилось при энергии пучка электронов 20 keV. Результаты микроанализа и оценка фазового состава представлены в таблице.

Элементный анализ исходного материала до его распыления (см. таблицу, рис. 2, a) показал присутствие кислорода в нем, что обусловлено особенностями технологического процесса синтеза SmS [4] и в дальнейшем его поверхностным окислением [30]. При этом кислород в образце SmS, как правило, находится в составе фазы

Данные элементного состава распыляемого материала 1.15Sm:1S и предположительная оценка содержания фаз в образце

Состав		Содержание в материале до распыления, at. %	Содержание в материале после распыления, at. %
Микроанализ	C	–	~ 9
	O	14	28
	S	34	27
	Sm	52	36
Предположительный фазовый состав		Sm _{1.15} S, Sm ₂ O ₂ S, Sm	Sm _{1.15} S, Sm ₂ O ₂ S, Sm ₂ S ₃ , Sm ₃ S ₄

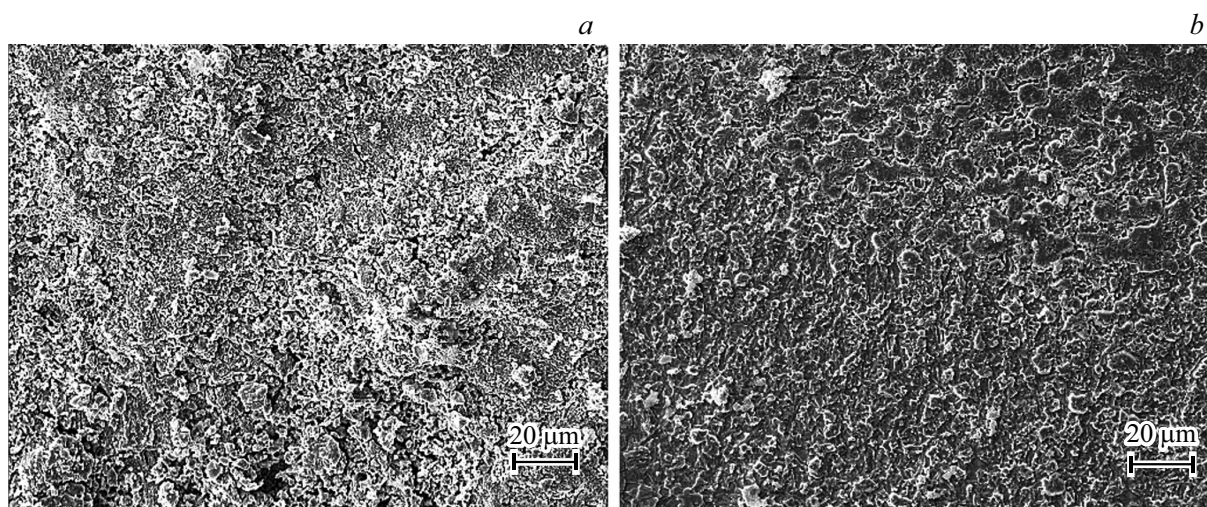


Рис. 2. Микрофотографии СЭМ поверхности образца Sm_{1.15}S: *a* — до распыления, *b* — после распыления.

оксисульфида самария Sm₂O₂S [30,31]. Полагая, что количественно весь кислород содержится в составе фазы Sm₂O₂S, и при этом оставшийся Sm и S содержится в составе фазы Sm_{1.15}S, на основе результатов микроанализа можно сделать вывод о наличии несвязанного Sm в исходном образце. Избыточный несвязанный Sm ранее также обнаруживался методами РЭМ в образцах SmS, которые были получены ампульным синтезом [32].

Проведенный микроанализ образца 1.15Sm:1S после его распыления (см. таблицу, рис. 2, *b*), демонстрирует уменьшение содержания Sm и S в составе при более значительном уменьшении доли самария. Также микроанализ показывает увеличение доли кислорода и наличие примеси углерода. Аналогично проведенной оценке состава материала 1.15Sm:1S до распыления можно предположить, что для этого образца после его распыления обнаруженная доля кислорода содержится в составе фазы Sm₂O₂S. В таком случае распыление 1.15Sm:1S методом электронно-лучевого нагрева приводит к полному испарению несвязанного Sm, к уменьшению содержания фазы Sm_{1.15}S и к образованию фаз с избыточным содержанием S, т. е. фаз Sm₂S₃, Sm₃S₄ [4].

Увеличение содержания кислорода в образце после распыления происходит из-за окисления образца

1.15Sm:1S при его нагреве, что связано, очевидно, с наличием кислорода в остаточной атмосфере вакуумной установки. Это указывает на необходимость оптимизации технологического процесса распыления (улучшение вакуума в камере и необходимость дополнительного обезгаживания тигля).

Наличие углерода в образце после распыления обусловлено частичным испарением материала тигля (сублимацией графита в вакууме) [33], в который помещался исходный образец 1.15Sm:1S. Это является одним из недостатков метода электронно-лучевого нагрева при использовании неохлаждаемого тигля [34].

Таким образом, как показали результаты проведенного микроанализа, при распылении SmS происходит изменение содержания элементов в распыляемом образце, в частности, происходит более активное распыление Sm из SmS. Исходя из этого, можно предположить, что в тонких пленках SmS, полученных методом электронно-лучевого нагрева, будет обнаруживаться избыток Sm в составе пленки и при этом наблюдаться неоднородность состава по толщине пленки. Наличие градиента концентрации Sm в тонких пленках можно использовать для повышения эффективности термоэлектрических преобразователей на основе SmS с высоким значением

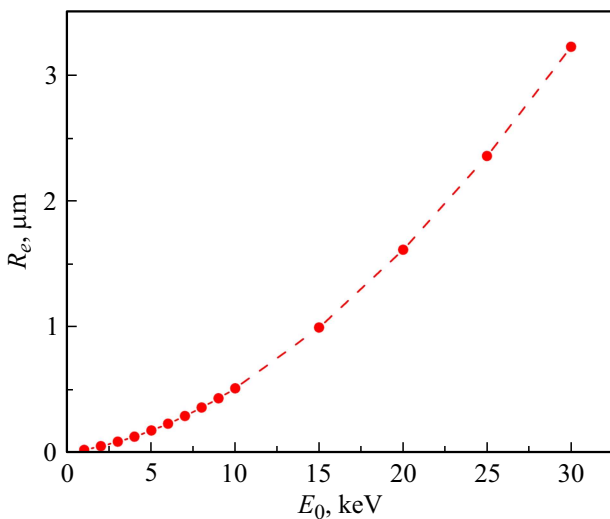


Рис. 3. Зависимость величины пробега пучка электронов в SmS от первичной энергии электронов.

термоЭДС [16,35]. Оценить изменение элементного состава пленки по толщине можно с помощью проведения микроанализа тонких пленок SmS при разном ускоряющем напряжении с помощью РЭМ, т.е. использовать зависимость максимальной глубины генерации рентгеновского характеристического излучения в образце от ускоряющего напряжения.

С использованием выражения (1) был построен график зависимости величины пробега электронов в SmS от их энергии (рис. 3).

Из полученной зависимости (рис. 3) следует, что при проведении микроанализа электронным пучком при энергиях E_0 5 и 20 keV генерация характеристического рентгеновского излучения для SmS будет происходить с глубины до 0.18 и до 1.6 μm соответственно. Микроанализ, проведенный при указанных энергиях, покажет элементный состав материала пленки до соответствующей толщины. Сравнивая результаты состава пленки, полученные при разных энергиях, можно сделать вывод о распределении распыляемых элементов по глубине получаемых пленок.

На рис. 4 представлены обобщенные результаты микроанализа, где показаны значения отношения содержания Sm к S для тонкопленочных образцов, которые получены распылением гранул SmS состава 1Sm:1S, 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S. В случае с пленкой, полученной распылением 1Sm:1S, при микроанализе с энергией 20 keV не удалось количественно оценить содержание Sm и S в ее составе, так как в спектре наблюдалось преобладание пиков от материала подложки. На основе этого можно предположить, что ее толщина составляла меньше величины пробега пучка электронов при 20 keV, что соответствует 1.6 μm . При микроанализе тонких пленок, полученных распылением 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S, с энергией электронного пучка 20 keV в спектре наблюдались пики от материала подложки, но

количественное содержание обнаруженных элементов подложки составляло менее 1%, что указывает на то, что толщина данных пленок $\text{SmS} \geq 1.6 \mu\text{m}$.

Согласно результатам микроанализа пленок (рис. 4), в слое толщиной до 0.18 μm наблюдается недостаток содержания Sm относительно S в сравнении с исходным составом распыляемого материала. При проведении микроанализа пленок на глубину до 1.6 μm для образцов 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S обнаруживается избыток содержания Sm к S, что согласуется с уменьшением содержания Sm при микроанализе исходного распыляемого материала.

Микроанализ тонких пленок SmS, полученных при распылении 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S, проведенный при энергии пучка 20 keV, показал наличие кислорода (~16%) и углерода (~11%) в их составе. Содержание кислорода в тонких пленках SmS сравнимо с его содержанием в исходном материале 1.15Sm:1S до распыления, что подтверждает наличие процесса окисления преимущественно исходного материала в процессе нагрева. Содержание углерода в тонких пленках SmS соответствует его содержанию в исходном материале после распыления, что указывает на попадание материала тигля как в исходный материал, так и в пленку при распылении образцов 1.15Sm:1S.

Для определения степени неоднородности состава пленок учитывают особенности генерации энергодисперсионных спектров по тяжелому элементу, содержащемуся в соединении. Поскольку в моносulfиде самария для Sm и S среди линий характеристической спектральной интенсивности максимальную энергию возбуждения имеет $L_{\alpha}\text{Sm}$ ($E_c = 6.716 \text{ keV}$) [36], при исследовании этого соединения энергии электронного пучка, равной 5 keV, не хватило для обнаружения этой линии (рис. 5).

На рис. 5 представлен энергодисперсионный спектр пленки, полученной распылением образца 1.15Sm:1S, в котором не обнаруживается L_{α} -линия от Sm. По этой причине микроанализ слоя толщиной до 0.18 μm показывает недостаток Sm по сравнению с его действительным содержанием.

Таким образом, проведенное сравнение результатов количественного микроанализа при $E_0 = 5$ и 20 keV

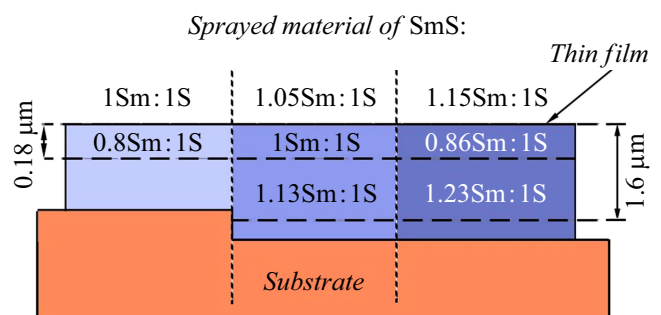


Рис. 4. Данные элементного микроанализа пленок SmS, полученных распылением образцов SmS разного состава

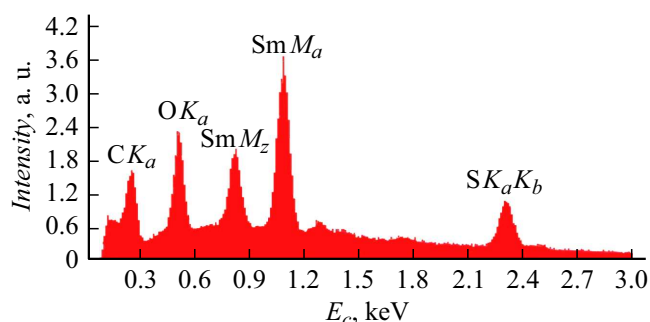


Рис. 5. Спектр характеристического излучения пленки, полученной при распылении 1.15Sm:1S.

показало, что для более точного определения градиента концентрации Sm и S по толщине пленки SmS необходимо проведение энергодисперсионной спектроскопии более толстых пленок SmS при энергиях электронного пучка $E_0 > 13.4$ keV для надежной регистрации линий Sm с величиной перенапряжения $E_0/E_c > 2$ [37].

Заключение

В работе методом электронно-лучевого нагрева объемных образцов SmS с соотношением элементов: 1Sm:1S, 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S были получены тонкие пленки SmS. С помощью РЭМ с использованием метода энергодисперсионной спектроскопии на примере образца состава 1.05Sm:1S установлено изменение элементного состава в распыляемом материале. Показано, что в процессе электронно-лучевого нагрева происходит более активное распыление Sm из исходного образца. Установлено, что в составе пленок, полученных распылением 1.05Sm:1S и 1.15Sm:1S, присутствует избыток содержания Sm. На основе зависимости глубины генерации рентгеновского характеристического излучения от энергии электронного пучка с использованием двухпоточковой модели транспорта заряженных частиц рассчитан пробег пучка электронов в SmS для энергий до 30 keV.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.В. Голубков, Е.В. Гончарова, В.П. Жузе, Г.М. Логинов, В.М. Сергеева, И.А. Смирнов. *Физические свойства халькогенидов РЗЭ* (Наука, Л., 1973)

- [2] А.В. Голубков, В.М. Сергеева. *ЖВХО*, **2** (6), 645 (1981).
- [3] R. Keller, G. Guntherodt, W.B. Holzapfel, M. Dietrich, F. Holtzberg. *Solid State Commun.*, **29**, 753 (1979). DOI: 10.1016/0038-1098(79)90154-6
- [4] O.V. Andreev, V.V. Ivanov, A.V. Gorshkov, P.V. Miodushevskiy, P.O. Andreev. *Eurasian Chemico-Technol. J.*, **18** (1), 55 (2016). DOI: 10.18321/ectj396
- [5] В.В. Каминский, А.А. Молодых, И.С. Полухин, С.М. Соловьев, К.В. Шуваев. *Письма в ЖТФ*, **40** (11), 1 (2014). [V.V. Kaminskii, A.A. Molodykh, I.S. Polukhin, S.M. Solov'ev, K.V. Shuraev. *Tech. Phys. Lett.*, **40** (6), 453 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014060066]
- [6] L. Li, S. Hirai, Y. Tasaki. *J. Rare Earths*, **34** (10), 1042 (2016). DOI: 10.1016/S1002-0721(16)60132-1
- [7] В.В. Каминский, Н.Н. Степанов, А.А. Молодых. *ФТТ*, **52** (7), 1269 (2010). [V.V. Kaminskiy, N.N. Stepanov, A.A. Molodykh. *Physics Solid State*, **52** (7), 1356 (2010). DOI: 10.1134/S106378341007005X]
- [8] В.В. Каминский, В.А. Сидоров, Н.Н. Степанов, М.М. Казанин, А.А. Молодых, С.М. Соловьев. *ФТТ*, **55** (2), 257 (2013). [V.V. Kaminskiy, V.A. Sidorov, N.N. Stepanov, M.M. Kazanin, A.A. Molodykh, S.M. Solov'ev. *Physics Solid State*, **55** (2), 293 (2013) DOI: 10.1134/S106378341302011X]
- [9] И.А. Пронина, Н.Д. Якушова, Д.Ц. Димитров, Л.К. Крастева, К.И. Папазова, А.А. Карманов, И.А. Аверин, А.Ц. Георгиева, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *Письма в ЖТФ*, **43** (18), 11 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45028.16754 [I.A. Pronina, N.D. Yakushova, D.Ts. Dimitrov, L.K. Krasteva, K.I. Papazova, A.A. Karmanov, I.A. Averin, A.Ts. Georgieva, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov. *Tech. Phys. Lett.*, **43** (9), 825 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017090255]
- [10] В.В. Каминский, С.М. Соловьев, Н.В. Шаренкова, S. Hirai, Y. Kubota. *Письма в ЖТФ*, **44** (23), 85 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47014.17235 [V.V. Kaminskii, S.M. Solov'ev, N.V. Sharenkova, S. Hirai, Y. Kubota. *Tech. Phys. Lett.*, **44** (12), 1087 (2018). DOI: 10.1134/S106378501812026X]
- [11] М.М. Казанин, В.В. Каминский, С.М. Соловьев. *ЖТФ*, **70** (5), 136 (2000). [M.M. Kazanin, V.V. Kaminskii, S.M. Solov'ev. *Tech. Phys.*, **45** (5), 659 (2000). DOI: 10.1134/1.1259698]
- [12] В.И. Стрелов, Е.Б. Баскаков, Ю.Н. Бендрьшев, В.М. Каневский. *Кристаллография*, **64** (2), 281 (2019). DOI: 10.1134/S0023476119020292 [V.I. Strellov, E.B. Baskakov, U.N. Bendryshev, V.M. Kanevskii. *Crystallography Reports*, **64** (2), 311 (2019). DOI: 10.1134/S1063774519020299]
- [13] В.М. Егоров, В.В. Каминский, М.М. Казанин, С.М. Соловьев, А.В. Голубков. *Письма в ЖТФ*, **41** (8), 50 (2015). [V.M. Egorov, V.V. Kaminskii, M.M. Kazanin, S.M. Solov'ev, A.V. Golubkov. *Tech. Phys. Lett.*, **41** (4), 381 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015040227]
- [14] В.В. Каминский, А.О. Лебедев, С.М. Соловьев, Н.В. Шаренкова. *ЖТФ*, **89** (2), 212 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47072.225-18 [V.V. Kaminskii, A.O. Lebedev, S.M. Solov'ev, N.V. Sharenkova. *Tech. Phys.*, **64** (2), 181 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219020075]
- [15] M.A. Grevtsev, G.D. Havrov, S.A. Kazakov, V.V. Kaminskii. *J. Phys.: Conf. Series*, **1038**, 012111 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012111

- [16] В.В. Каминский, М.М. Казанин. Письма в ЖТФ, **34** (8), 92 (2008). [V.V. Kaminskii, M.M. Kazanin. Tech. Phys. Lett., **34** (4), 361 (2008). DOI: 10.1134/S1063785008040263]
- [17] В.Г. Бамбуров, О.В. Андреев, В.В. Иванов, А.Н. Воропай, А.В. Горшков, А.А. Полковников, А.Н. Бобылев. ДАН, **473** (6), 676 (2017).
- [18] В.В. Каминский, М.М. Казанин, С.М. Соловьев, Н.В. Шаренкова, Н.М. Володин. ФТП, **40** (6), 672 (2006). [V.V. Kaminskii, M.M. Kazanin, S.M. Solov'ev, N.V. Sharenkova, N.M. Volodin. Semiconductors, **40** (6), 651 (2006). DOI: 10.1134/S1063782606060078]
- [19] Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников, М.В. Хахленков. Вестн. Вор. гос. тех. ун-та, **10** (6), 135 (2014).
- [20] П.Е. Тетерин, А.В. Зенкевич, Ю.Ю. Лебединский, О.Е. Парфенов. Труды научной сессии МИФИ, **3**, 172 (2010).
- [21] E. Rogers, P.F. Smet, P. Dorenbos, D. Poelman, E. van der Kolk. J. Phys. Condens. Matter., **22**, 015005 (2010). DOI: 10.1088/0953-8984/22/1/015005
- [22] В.И. Стрелов, Е.Б. Баскаков, В.В. Артемов. Тез. докл. XXVIII Росс. конф. по электронной микроскопии (Черноголовка, Россия, 2020), т. 3. с. 97.
- [23] Е.Б. Баскаков, В.И. Стрелов. Кристаллография, **66** (6), 925 (2021). DOI: 10.31857/S0023476121060059 [E.B. Baskakov, V.I. Strelov. Crystallography Reports, **66** (6), 1078 (2021). DOI: 10.1134/S1063774521060055]
- [24] А.С. Высоких, П.В. Миодушевский, П.О. Андреев. Вестн. ТГУ, **5**, 179 (2011).
- [25] Н.Н. Михеев. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **8**, 56 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819080109 [N.N. Mikheev. J. Synch. Investig, **13** (4), 719 (2019). DOI: 10.1134/S1027451019040281]
- [26] В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьев. Плазменные покрытия (методы и оборудование). (Изд-во Томского политех. ун-та, Томск, 2007).
- [27] Б.А. Мовчан, Н.Д. Тутов. Известия Курского гос. тех. ун-та, **26** (1), 12 (2009).
- [28] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. ФТП, **43** (11), 1564 (2009). [L.K. Markov, I.P. Smirnova, A.S. Pavlyuchenko, E.M. Arakcheeva, M.M. Kulagina. Semiconductors, **43** (11), 1521 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609110219]
- [29] K.S.S. Narsha. *Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films* (Elsevier, Great Britain, 2006).
- [30] А.С. Высоких, О.В. Андреев, Л.А. Головина. Вестник тюменского гос. ун-та, **3**, 124 (2007).
- [31] А.С. Высоких. Автореф. дисс. (Тюмень, Тюменский гос. ун-т, 2011)
- [32] И.С. Волчков, Е.Б. Баскаков, В.И. Стрелов, В.М. Каневский. Письма в ЖТФ, **45** (22), 12 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48641.17859 [I.S. Volchkov, E.B. Baskakov, V.I. Strelov, V.M. Kanevskii. Tech. Phys. Lett., **45** (11), 1127 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019110294]
- [33] С.А. Щукарев. *Лекции по общему курсу химии* (Изд-во ЛГУ, Л., 1962)
- [34] А. Иванов, Б. Смирнов. Наноиндустрия, **6** (36), 28 (2012).
- [35] В.В. Каминский, В.А. Дидик, М.М. Казанин, М.В. Романова, С.М. Соловьев. Письма в ЖТФ, **35** (21), 16 (2009). [V.V. Kaminskii, V.A. Didik, M.M. Kazanin, M.V. Romanova, S.M. Solov'ev. Tech. Phys. Lett., **35** (21), 981 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009110030]
- [36] Л.И. Миркин. *Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов*, под ред. проф. Я.С. Уманского (Гос. изд. Физматлит, М., 1961), с. 12.
- [37] J. Goldstein, H. Yakowitz, D.E. Newbury, E. Lifshin, J.W. Colby, J.R. Coleman. *Practical Scanning Electron Microscopy* (Plenum Press, NY., 1975), p. 85.