

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-201-221>



Структура и свойства тонких магнетронных пленок арсенида кадмия на различных подложках

А. В. Кочура¹ ✉, Зо Хтет Аунг¹, В. С. Захвалинский², Е. А. Пиллюк²,
Е. П. Кочура¹, А. Ю. Риль³, В. М. Емельянов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Белгородский государственный университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

³ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук
Ленинский проспект, д. 31, г. Москва 119991, Российская Федерация

✉ e-mail: akochura@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Получение магнетронных пленок арсенида кадмия на различных подложках и изучение их структуры, состава, оптических и электрических свойств.

Методы. Напыление тонких пленок арсенида кадмия осуществлялось методом не реактивного высокочастотного магнетронного напыления в атмосфере аргона. Структура и состав пленок исследовались с помощью рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, малоугловой рентгеновской дифрактометрии. Оптические исследования выполнялись с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света. Приведены результаты исследования электрических свойств тонких пленок арсенида кадмия.

Результаты. На подложках из кремния, сапфира и титаната стронция получены тонкие пленки дираковского полуметалла – арсенида кадмия с толщиной около 40 нм. Исследование их структуры и состава показало существенное влияние следующего за напылением отжига в атмосфере аргона на кристалличность пленки. После отжига независимо от кристаллической структуры подложки частичное ориентирование пленки с осью текстуры (112). Наиболее близкие к стехиометрическому составу пленки получены при напылении с последующим отжигом на ориентированную подложку из титаната стронция, а к кристаллической структуре монокристаллов арсенида кадмия пленки на подложке из сапфира. Отжиг также приводит к сглаживанию поверхности пленки, уменьшению дефектов структуры и переходу фрактальной размерности ее топологии к двумерной от близкой к трехмерной непосредственно после напыления. Оптические свойства после отжига также изменяются, что свидетельствует об их переходе от поликристаллического (аморфного) состояния к монокристаллическому (текстурированному).

Заключение. Выполненные различными методами экспериментальные исследования структуры и свойств позволили установить, что контролируемым отжигом можно получать монокристаллические или текстурированные пленки арсенида кадмия, пригодные для исследования проявления топологических свойств.

Ключевые слова: магнетронное напыление; тонкие пленки; арсенид кадмия; текстурирование; дираковский полуметалл.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (з/з № 0851–2020–0035) и в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

© Кочура А. В., Зо Хтет Аунг, Захвалинский В. С., Пиллюк Е. А., Кочура Е. П., Риль А. Ю.,
Емельянов В. М., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2023; 13(2): 201–221

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Структура и свойства тонких магнетронных пленок арсенида кадмия на различных подложках / А. В. Кочура, Зо Хтет Аунг, В. С. Захвалинский, Е. А. Пилук, Е. П. Кочура, А. Ю. Риль, В. М. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 201–221. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-201-221>

Поступила в редакцию 28.03.2023

Подписана в печать 27.04.2023

Опубликована 30.05.2023

Structure and Properties of Thin Magnetron Films of Cadmium Arsenide on Various Substrates

Aleksey V. Kochura¹ ✉, Zaw Htet Aung¹, Vasilii S. Zakhvalinsky²,
Evgeny A. Pilyuk², Evgenya P. Kochura¹, Aleksey Yu. Ril³, Viktor M. Emelyanov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Belgorod State National Research University
Pobeda Str. 85, Belgorod 308015, Russian Federation

³ Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of Russian Academy of Sciences
31 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation

✉ e-mail: akochura@gmail.com

Abstract

Purpose of the study. Synthesis of cadmium arsenide magnetron films on various substrates and study of their structure, composition, optical and electrical properties.

Methods. The deposition of thin films of cadmium arsenide was carried out by the method of non-reactive high-frequency magnetron sputtering in an argon atmosphere. The structure and composition of the films were studied using X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, energy dispersive analysis, and small-angle X-ray diffractometry. Optical studies were performed using Raman spectroscopy. The results of a study of the electrical properties of thin films of cadmium arsenide are presented.

Results. On silicon, sapphire, and strontium titanate substrates, thin films of the Dirac semimetal, cadmium arsenide, were obtained with a thickness of about 40 nm. A study of their structure and composition showed a significant effect of annealing in an argon atmosphere following deposition on the crystallinity of the film. After annealing, regardless of the crystal structure of the substrate, partial orientation of the film with the (112) texture axis. The films closest to the stoichiometric composition were obtained by deposition followed by annealing onto an oriented strontium titanate substrate, and to the crystal structure of cadmium arsenide single crystals of a film on a sapphire substrate. Annealing also leads to a smoothing of the film surface, a decrease in structural defects, and the transition of the fractal dimension of its topology to two-dimensional from close to three-dimensional immediately after deposition. The optical properties after annealing also change, which indicates their transition from a polycrystalline (amorphous) state to a single-crystal (textured).

Conclusion. Experimental studies of the structure and properties performed by various methods made it possible to establish that single-crystal or textured cadmium arsenide films suitable for studying the manifestation of topological properties can be obtained by controlled annealing.

Keywords: magnetron sputtering; thin films; cadmium arsenide; texturing; Dirac semimetal.

Funding: This study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (0851-2020-0035) and Prioritet-2030 program (075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kochura A. V., Aung Zaw Htet, Zakhvalinsky V. S., Pilyuk E. A., Kochura E. P., Ril A. Yu., Emelyanov V. M. Structure and Properties of Thin Magnetron Films of Cadmium Arsenide on Various Substrates. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(2): 201–221. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-201-221>

Received 28.03.2023

Accepted 27.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

Арсенид кадмия (Cd_3As_2) – инвертированный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,17 эВ при $T = 4,2$ К. Он обладает аномально высокой подвижностью носителей заряда (выше $10^2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 300$ К) [1] – наивысшей среди известных инвертированных полупроводников. Технологические трудности с получением арсенида кадмия с низкой концентрацией носителей заряда тормозили широкое использование этого материала на практике, поскольку еще одной его характерной особенностью является сильная зависимость эффективной массы электронов от их концентрации. Такое возможно, когда зона проводимости имеет параболическую форму. В этом случае дисперсия энергии ($E_e(p)$) носителей заряда будет прямо пропорционально зависеть от импульса (p), в отличие от классического случая, когда энергия носителей пропорциональна квадрату импульса. Попытки объяснить такие свойства строились на использовании кейновского закона дисперсии, устанавливающего, что при относительно малых энергиях $E_e(p) \sim p^2$, а при больших энергиях $E_e(p) \sim p$ не привели к удовлетворительному согласию теоретических расчетов и экспериментов по изучению оптических и электрических свойств в плане определения величины ширины запрещенной зоны и характера подзон проводимости [2].

Интерес к исследованию свойств арсенида кадмия значительно вырос относи-

тельно недавно, когда по результатам теоретических [3] и экспериментальных [4; 5] исследований было установлено, что кристаллическая структура Cd_3As_2 обладает симметрией, способствующей образованию в зонной структуре топологически защищенных конусов Дирака, т. е. арсенид кадмия является дираковским полуметаллом, у которого носители заряда – дираковские фермионы имеют нулевую эффективную массу и подчиняются релятивистским законам движения. Такие материалы весьма перспективны для использования в сверхбыстродействующих устройствах вплоть до аттосекундного диапазона [6].

Следует также добавить, что в дополнение к чрезвычайно высокой электронной подвижности арсенид кадмия демонстрирует очень высокое магнитосопротивление [1], аномальный эффект Нернста [7] и квантовый эффект Холла в пленках [8; 9]. Кроме того, для тонких слоев наблюдаются признаки киральной аномалии, планарного эффекта Холла и переноса электронов через поверхностные состояния [10–13]. Эти эффекты также считаются связанными с релятивистским характером зонной структуры арсенида кадмия и способствуют использованию этого соединения в термоэлектрике [14; 15], терагерцевой плазмонике [16], высокочувствительном широкополосном быстродействующем фотодетектировании [17] и высокотемпературной спинтронике [18].

Недавно было показано, что при низких температурах в Cd_3As_2 приложением

внешнего давления до 13 ГПа может стимулироваться возникновение сверхпроводящей фазы [19]. При дальнейшем исследовании этого эффекта было обнаружено, что сверхпроводимость монокристаллов Cd_3As_2 может быть наведенной точечным контактом [20–22]. Подобный эффект наблюдался также и в тонких аморфных слоях Cd_3As_2 без приложения внешнего напряжения [23; 24]. Природа такого сверхпроводящего состояния обсуждается и может быть объяснена перестройкой зонной структуры [19] при приложении внешнего давления, образованием поверхностных топологически защищенных состояний в зоне проводимости из-за влияния границы контакта металл/арсенид кадмия [25] или небольших отклонений от стехиометрии по кадмию [26] в аморфных пленках. Недавно было показано, что подобные состояния в тонких эпитаксиальных пленках Cd_3As_2 разрушаются при увеличении магнитного поля, причем критическая величина этого поля зависит от толщины пленки [27].

Таким образом, структура и состав пленок Cd_3As_2 существенно влияют на их электрические свойства, и для гарантированного наблюдения эффектов, сопутствующих появлению топологически защищенных состояний, а также управления ими требуется проведение предварительных исследований влияния особенностей напыления пленок Cd_3As_2 на их структурные, оптические и электрические свойства.

Тонкие пленки обычно разделяют по методам их получения и типам подложек, на которые наносится исследуемый материал. Из физических методов напыления Cd_3As_2 можно выделить: вакуум-термическое осаждение, магнетронное напыление (МН), лазерное осаждение, молекулярно-лучевую эпитаксию [5; 28–35]. В качестве подложек выбирались: кремний (Si) [33], сапфир [33; 35] (Al_2O_3), теллурид кадмия [30; 34], арсенид галлия [5], аморфное

стекло [28], кварц [36], хлорид натрия [32], ситалл [37], титанат стронция (SrTiO_3) [38], сульфид кадмия [39]. Наиболее качественные по структуре и составу пленки были получены с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии на кристаллических подложках. Особенности напыления пленок этим методом, а также методом вакуум-термического осаждения изучены достаточно полно, в то время как другой перспективный метод МН использовался редко, несмотря на его основные преимущества: относительная низкая стоимость, простота, возможность поддерживать условия напыления близкими к равновесным. В настоящей работе представлены результаты исследования структуры и физических свойств тонких пленок арсенида кадмия, полученных магнетронным методом на различных подложках.

Материалы и методы

Осаждение пленок арсенида кадмия осуществлялось в малогабаритной вакуумной установке магнетронного напыления МВУ ТМ МАГНА Т. В качестве подложек выбирались кристаллические пластины SrTiO_3 с ориентацией (001) и Al_2O_3 с ориентацией (0001), поскольку они имеют наилучшее кристаллическое сродство с Cd_3As_2 и не требуют при своем использовании буферных слоев [35; 38]. Для получения пленок с меньшей степенью кристалличности использовались подложки кристаллического кремния КДБ 0,5 (100) с слоем естественного окисла на поверхности. Размеры подложек составляли $1 \times 1 \text{ см}^2$. Предварительная подготовка подложек к напылению заключалась в очистке их поверхности в плазменной установке низкого давления PICO (Diener Electronic). В камере напыления поддерживается вакуум 10^{-3} Па .

Для генерации наносимого потока вещества применялась планарная магне-

тронная распылительная система с дисковой мишенью диаметром 60 мм и толщиной 6 мм. Режим напыления был высокочастотным неактивным (в атмосфере аргона). Расположение мишени и держателя подложек было осесимметричное. В качестве материала мишени использовался порошок с размером частиц не более 100 мкм, полученный перемалыванием из монокристаллов Cd_3As_2 . Эти монокристаллы синтезировались по методике, детально описанной в [33]. Вначале из навесок особоистых порошков элементарных составляющих Cd и As прямым сплавлением в вакууме при температуре $T = 1100$ К в течение 10 часов синтезировался расплав Cd_3As_2 , который кристаллизовался в результате охлаждения до комнатной температуры в течение 50 часов. Затем полученные поликристаллические слитки перемалывались. Их фазовый состав оценивался с помощью порошковых дифрактограмм рентгеновского излучения (рентгенофазовый анализ – РФА), который подтверждал формирование кристаллической решетки с параметрами, соответствующими параметрам Cd_3As_2 .

На следующей стадии синтеза монокристаллы выращивались из паровой фазы перегонкой сублимирующего вещества из зоны испарения ($T = 950$ К) в более холодную зону осаждения ($T = 770$ К). Получившиеся в итоге кристаллы миллиметровых и субмиллиметровых размеров использовались для изготовления мишени. В большинстве своем имели форму, характерную для материалов с тригональной симметрией (пирамиды, призмы) кристаллической решетки и по результатам рентгенодифракционных измерений имели при комнатной температуре пространственную группу симметрии $I41cd$, которой обладают монокристаллы основной полиморфной модификации Cd_3As_2 (α -фаза) [40].

Пленки напылялись в течение 40 минут. Температура подложки поддерживалась постоянной и составляла 390 К. Всего для каждого типа подложки напылялось по две пленки, одна из которых подвергалась дополнительному отжигу при температуре 673 К в течение 40 мин в атмосфере аргона для предотвращения испарения атомов мышьяка с поверхности пленки.

Структура и состав материала мишени и пленок определялась с помощью РФА. Для этого использовался порошковый рентгеновский дифрактометр GBC ЕММА. Анализ проводился в фокусирующей геометрии Брэгга – Брентано с использованием медного анода и линии излучения $K\alpha$ с длиной волны 1,5401 Å. Шаг по углу θ составлял $0,01^\circ$, ошибка установки $\Delta\theta$ не превышала $5 \cdot 10^{-4}^\circ$. Тестовые измерения проводились на дифрактометре Bruker D8 Advance с шагом по углу θ $0,006^\circ$, $\Delta\theta < 10^{-4}^\circ$. Один из монокристаллов Cd_3As_2 использовался для точного определения кристаллической структуры и параметров решетки на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab.

Элементный состав поверхности пленок исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке JSM-6610LV (JEOL), оснащенной энергодисперсионным рентгеновским спектрометром X-MaxN (Oxford Instr.) с разрешением не хуже 3 нм и минимальной площадью пятна электронного пучка для определения элементного состава 1 мкм^2 .

Колебательная спектроскопия комбинационного рассеяния света выполнялась на конфокальном спектрометре OmegaScopeTM (AIST-NT Inc.). Возбуждение осуществлялось лазером с длиной волны 532 нм, мощностью 30 мВт. Для получения спектра возбужденного излучения использовалась дифракционная решетка с плотностью штрихов 1800 мм^{-1} , обеспечивающая спектральное разрешение в измеряемой области $0,8 \text{ см}^{-1}$.

Для определения толщины и структуры поверхности пленок использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ). Измерения выполнялись полуконтактным методом на сканирующем зондовом микроскопе AIST-NT SmartSPM. Для определения наноразмерных характеристик структуры образца и уточнения результатов РФА и АСМ использовалась малоугловая рентгеновская дифрактометрия (МУРД) на установке SAXSess mc² со встроенным программным обеспечением для вычисления функций рассеяния и парного распределения структур.

Результаты и их обсуждение

Дифракция рентгеновского излучения

При исследовании методом РФА пленок Cd_3As_2 на различных подложках, не подвергавшихся отжигу, был установлен их поликристаллический характер, поскольку наблюдаются многие из разрешенных дифракции от кристаллографических плоскостей и их существенное уширение (рис. 1).

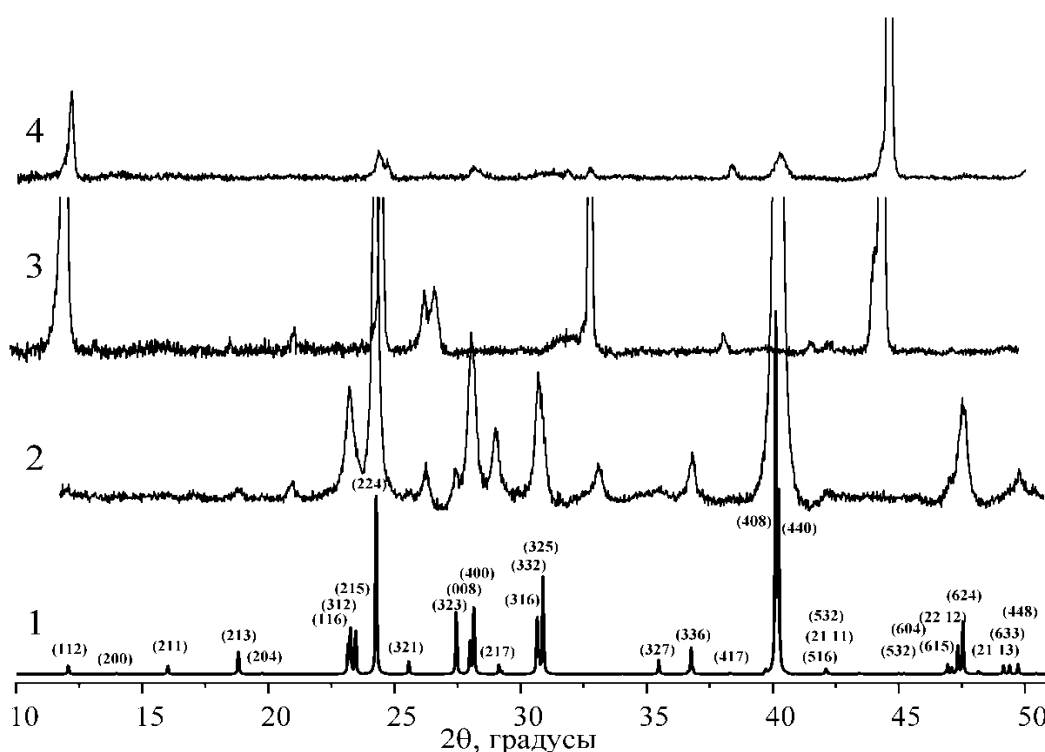


Рис. 1. Дифрактограммы неотожженных магнетронных пленок Cd_3As_2 : 1 – теоретическая для структуры $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$; 2 – исходного порошка для мишени; 3 – напыление на Si подложку; 4 – напыление на Al_2O_3 подложку

Fig. 1. Diffractograms of unannealed Cd_3As_2 magnetron films: 1 - theoretical for the structure $\alpha\text{-d}_3\text{As}_2$; 2 – initial powder for the target; 3 – deposition on Si substrate; 4 – deposition on the Al_2O_3 substrate

При идентификации Cd_3As_2 учитывалось, что его кристаллическая структура может иметь три полиморфные модификации с тетрагональной структурой: $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$ ($I4_1cd$, п.г. 110), стабильной при низких температурах ($T < 503$ К), метастабильными $\alpha'\text{-Cd}_3\text{As}_2$ ($P4_2/nbc$, п.г.

133) и $\alpha''\text{-Cd}_3\text{As}_2$ ($P4_2/nmc$, п.г. 137), существующими в диапазоне температур 503–750 К и 750–876 К соответственно, и высокотемпературную ($T > 876$ К) кубическую гранецентрированную $\beta\text{-Cd}_3\text{As}_2$ ($P4_232$, п.г. 208). Идентификацию точной структуры фазы Cd_3As_2 по порошковым

дифрактограммам затрудняет то, что положение большинства интенсивных дифракционных пиков для α , α' и α'' -фаз близки, однако α' - и α'' -фазы формируются главным образом только при использовании для синтеза высокотемпературных расплавных методов и методов осаждения из газовой фазы. В нашем случае использовалось магнетронное напыление, при котором не происходит фазовых переходов, а только кинетическое воздействие и относительно невысокий нагрев с последующим охлаждением ниже температур фазовых переходов. Поэтому основная идентификация проводилась с теоретическими данными по расчету от кристаллической структуры α - Cd_3As_2 ($I4_1cd$, п.г. 110). Эти расчеты автоматически выполнялись в программе симуляции порошковых дифрактограмм Powder Cell for Windows 2.4 и по ним проводилась индексация основных дифракционных пиков от пленок Cd_3As_2 , напыленных на различные подложки.

После отжига для всех пленок вид дифрактограмм РФА существенно изменяется (рис. 2). Если исключить дифракции от подложек и материала держателей образцов, то для всех пленок Cd_3As_2 наблюдаются дифракционные пики только семейства плоскостей (112) (рис. 3). Это говорит о высокой степени кристалличности пленок и возможном их текстурировании с осью текстуры (112). Подгонка экспериментальных дифрактограмм к теоретической кривой для α - Cd_3As_2 , выполненная методом Ритвельда, позволяет определить параметры кристаллической решетки отожженных пленок (табл. 1). При их сравнении с параметрами монокристалла хорошо видно их уменьшение вследствие влияния структуры подложки, причем на подложках SrTiO_3 и Si дисторсия выражается сильнее, чем для пленки на подложке Al_2O_3 . В последнем случае искажение кристаллической решетки по параметру c наименьшее $\Delta c/c = 0,054\%$

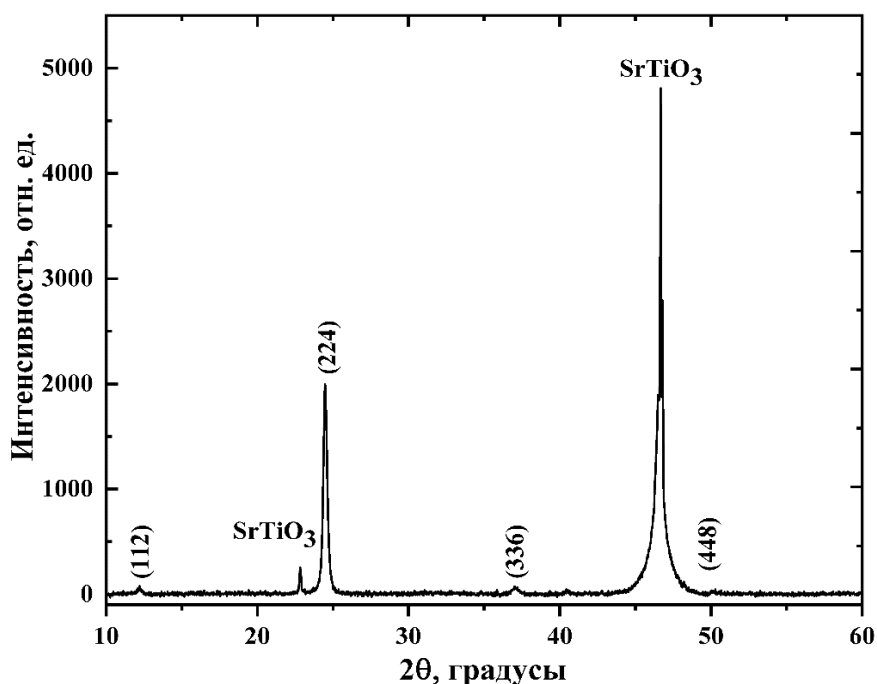


Рис. 2. Дифрактограмма магнетронной пленки Cd_3As_2 на подложке SrTiO_3 после отжига

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of a Cd_3As_2 magnetron film on a SrTiO_3 substrate after annealing

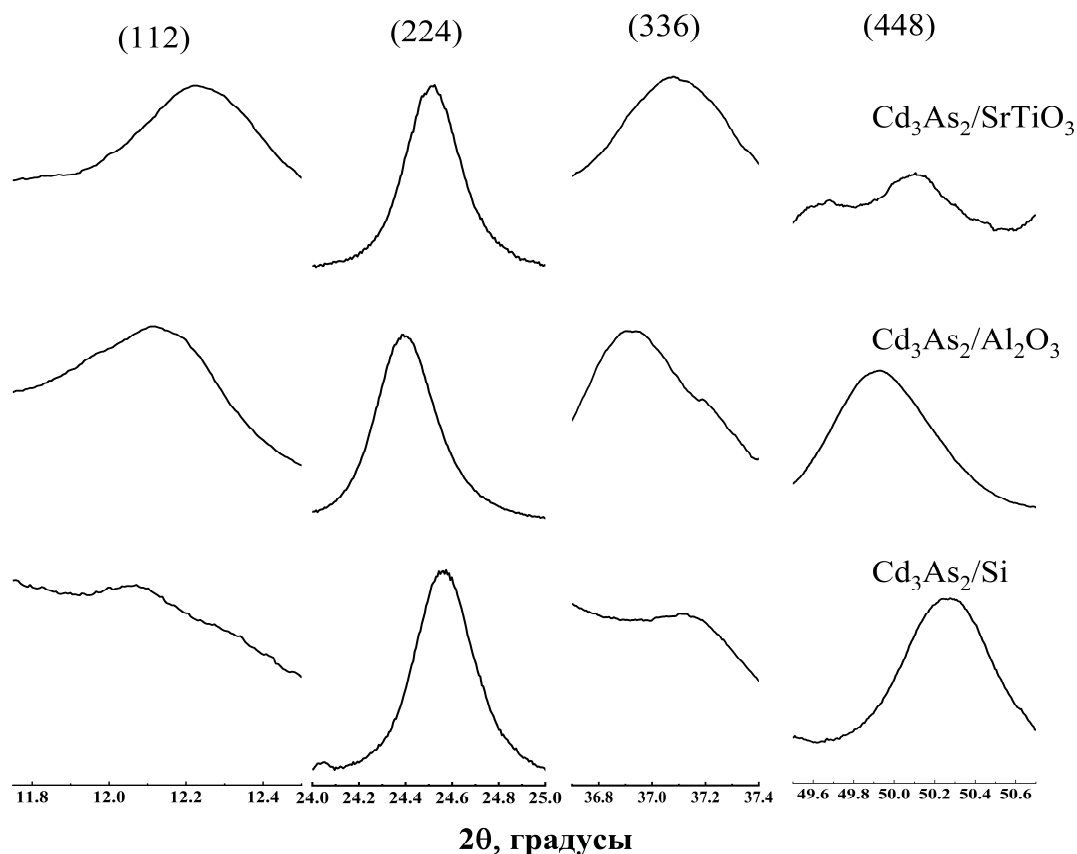


Рис. 3. Семейство плоскостей (112) α - Cd_3As_2 , идентифицируемое для пленок Cd_3As_2 на различных подложках после отжига

Fig. 3. Family of planes (112) α - Cd_3As_2 , identified for Cd_3As_2 films on various substrates after annealing

Таблица 1. Парметры кристаллической решетки монокристалла α - Cd_3As_2 и магнетронных пленок на различных подложках после отжига

Table 1. Crystal lattice parameters of an α - Cd_3As_2 single crystal and magnetron films on various substrates after annealing

Образец	Параметр решетки, Å	
	$a = b$	c
Монокристалл α - Cd_3As_2	12.6848	25.4887
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$	12.51(9)	25.45(5)
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	12.56(8)	25.47(5)
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$	12.52(3)	25.45(8)

Сканирующая электронная микроскопия

СЭМ-изображения поверхности всех пленок Cd_3As_2 показывают высокую степень их структурной однородности (рис. 4, а). Структурные неоднородности наблюдаются на изображениях с высоким

разрешением и имеют размеры в несколько десятков нанометров (рис. 4, б). При построении карт распределения Cd и As по поверхности в микрометровом масштабе также не было обнаружено отклонения от гомогенности (рис. 4, в, г).

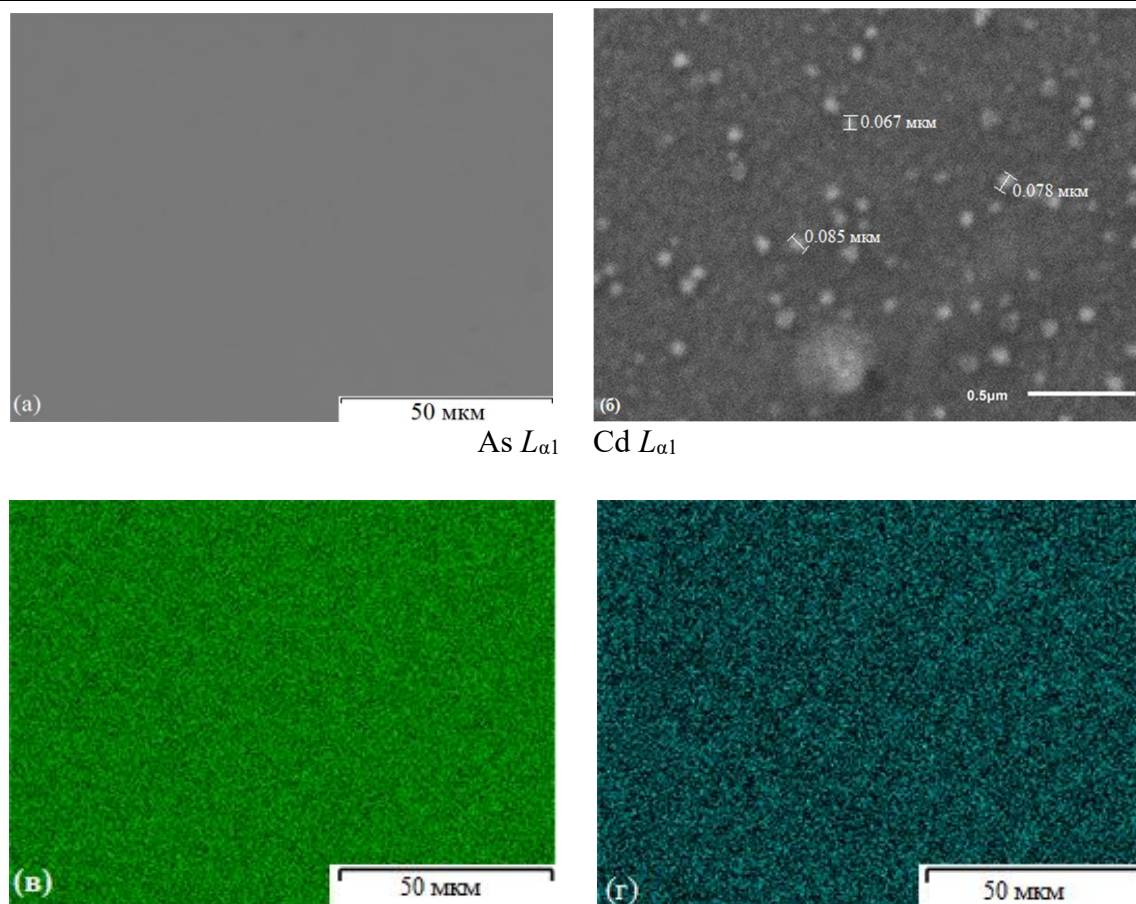


Рис. 4. СЭМ-изображения отожженной пленки Cd_3As_2 на подложке Al_2O_3 (а, б); карты распределения As и Cd по участку поверхности пленки (в, г)

Fig. 4. SEM images of the annealed Cd_3As_2 film on the Al_2O_3 substrate (a, б); maps of the distribution of As and Cd over the area of the film surface (в, г)

Анализ результатов определения химического состава поверхности показывает, что пленки, не подвергавшиеся отжигу, имели отклонение δ_s от стехиометрии Cd:As (3:2) в сторону уменьшения содержания As. Это отклонение было наибольшим у пленок сразу после напыления и достигало 7,5 ат. %, но значительно уменьшалось после отжига, достигая наименьшего значения в $\delta_s = 1,34\%$ у пленки $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$. Такой недостаток As может наблюдаться из-за высокой скорости реиспарения атомов мышьяка, поскольку согласно тензиметрическим измерениям у поверхности Cd_3As_2 [41] давление паров As значительно выше давления паров Cd. Во время отжига испарению As с поверхности пленки препятствует атмосфера аргона, а диффузия атомов As из

глубинных слоев пленки выравнивает их содержание по всей пленке.

Сканирующая зондовая микроскопия

На рисунке 5 показаны типичные АСМ-изображения изучаемых магнетронных пленок. Хорошо видно, что пленки являются сплошными с гранулированной структурой поверхности с минимальным размером неоднородностей как до отжига, так и после отжига около 30 нм близким по величине к их толщине (36 нм для $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$; 43 нм для $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и 38 нм для $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$), но при этом пленки после отжига становились более однородными по высоте и демонстрировали сегрегацию наноразмерных неоднородностей в более крупные кластеры.

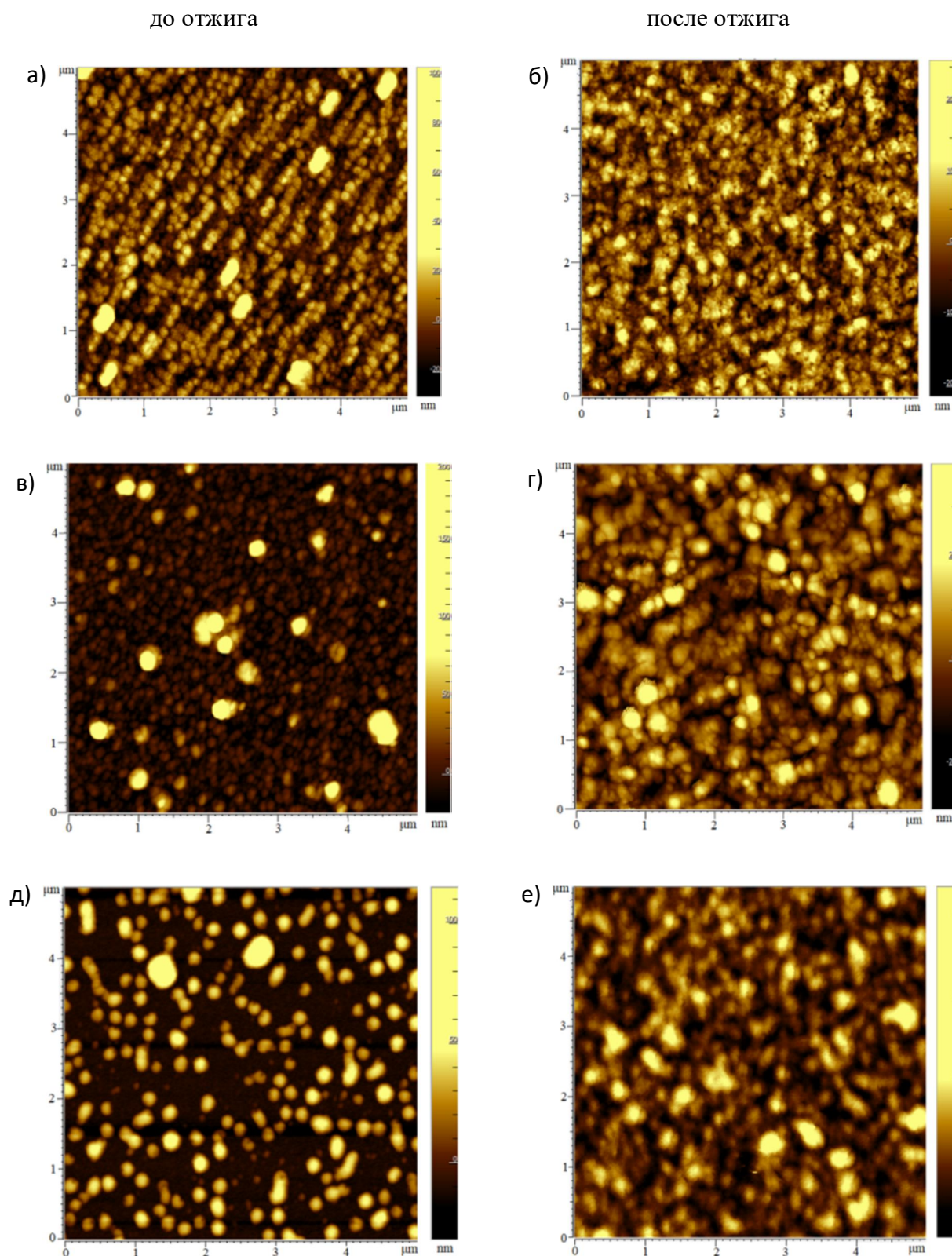


Рис. 5. АСМ-изображения поверхности тонких пленок на площадке $5 \times 5 \text{ мкм}^2$: а, б – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$; в, г – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; д, е – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$

Fig. 5. AFM images of the surface of thin films on an area of $5 \times 5 \text{ μm}^2$: а, б – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$; в, г – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; д, е – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$

Для определения типа кластерной морфологии пленок выполнялась обработка АСМ-изображений. С помощью программного пакета Digimizer определялось число и размеры всех наноразмерных неоднородностей на АСМ-изображениях (см. рис. 4): определялись средний размер нанокластера L , их количество N и средний латеральный размер составляющих его наночастиц d . Последняя величина не превышала 40 нм, а L имел значения в диапазоне 50–100 нм, что косвенно может служить подтверждением 3-мерности напыленных пленок.

Для более точного определения фрактальной размерности кластера D исследуемых пленок использовалось выражение

$D = \ln N / \ln(L/d)$ [42], которое применяется для описания кластеризации тонких металлических пленок [43; 44].

Полученные средние значения D для магнетронных нанопленок Cd_3As_2 приведены в таблице 2. Для неотожженных пленок $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$ и $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ D существенно превышает 2, что в соответствии с выводами [43; 44] указывает на трехмерность морфологии поверхностей. В то же время после отжига этих пленок кластеризация морфологии их поверхности приближается к двумерной фрактализации. Для пленок $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$ фрактальная размерность кластеров слабо зависит от отжига и практически является двумерной.

Таблица 2. Фрактальные размерности магнетронных пленок Cd_3As_2 на различных подложках

Table 2. Fractal dimensions of Cd_3As_2 magnetron films on various substrates

Тип пленки	Фрактальная размерность, D	
	до отжига	после отжига
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$	2,6	2,2
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	2,7	2,4
$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$	2,2	2,1

Малоугловая рентгеновская дифрактометрия

Метод МУРД относится к методам рентгеноструктурного анализа диффузного типа, что позволяет получать прямые данные о форме и взаимном распределении рассеивающих частиц в просвечиваемом слое образца. Так как исследуемые слои Cd_3As_2 невозможно было отделить от подложек, то для корректного определения малоугловой дифракции именно от Cd_3As_2 измерения выполнялись отдельно для пленок и таких же размеров подложек, а результат итогового дифракционного рассеяния получался вычитанием одной кривой дифракции из другой.

После обработки результатов в предположении, согласуемом с результатами АСМ-измерений, что форма частиц близка к цилиндрической с примерно равными вдоль всех осей размерами, были построены функции распределения парных расстояний между наночастицами $p(r)$, которые учувствуют в малоугловом рассеянии рентгеновского излучения. Полученные кривые изображены на рисунке 5 и характеризуют размеры наночастиц из которых формируются исследуемые пленки Cd_3As_2 . Пленки, не подвергшиеся отжигу, демонстрируют малые величины парных расстояний, что говорит о высокой степени разупорядочения в пленках, т. е. об их аморфизации.

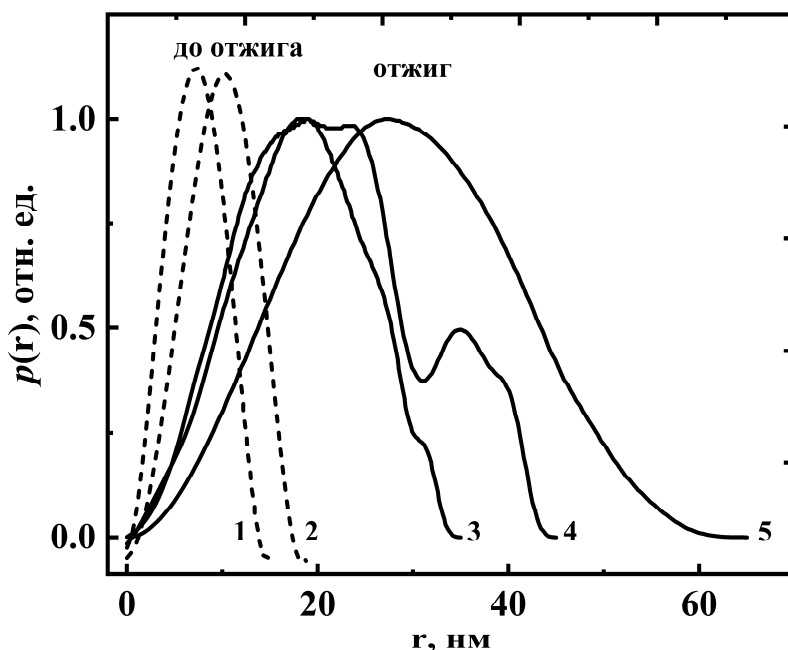


Рис. 5. Функция парного распределения наноструктур пленок Cd_3As_2 на различных подложках до отжига 1 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; 2 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$; после отжига 3 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$; 4 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; 5 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$

Fig. 5. The function of pairwise distribution of nanostructures of Cd_3As_2 films on various substrates before annealing: 1 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; 2 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$; after annealing: 3 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$; 4 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; 5 – $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$

После отжига нанокристаллиты объединяются, средний размер неоднородностей увеличивается более чем в два раза, что говорит о начале кристаллизации пленок, усложнение вида функций $p(r)$ говорит о том, что этот процесс не завершён и сопряжен с изменением формы кристаллитов.

Комбинационное рассеяние света

КРС-спектры колебаний кристаллической решетки всех исследуемых образцов в дальней ИК-области приведены на рисунке 6. Для пленок, не подвергшихся термическому отжигу, они имеют вид, наблюдаемый у разупорядоченных поликристаллических веществ с большим количеством дефектов кристаллической решетки. После отжига количество дефектов уменьшается для пленок на монокристаллических подложках Al_2O_3 и SrTiO_3 и их КРС-спектры приобретают вид, схожий с наблюдаемым для монокристаллов.

В работе [45] с помощью теоретико-группового метода для кристаллической структуры $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$ показано, что колебания решетки этого соединения имеют достаточно сложную структуру. Согласно этим вычислениям вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна может наблюдаться 145 КРС-активных фононов: $\Gamma^R = 26A_1 + 27B_1 + 27B_2 + 65E$. Практически все из них располагаются в области $\omega < 100 \text{ см}^{-1}$ и их полная экспериментальная идентификация не проведена до сих пор. Однако для характеристики наноструктур, содержащих Cd_3As_2 , в настоящее время используют колебания в области спектра $\omega > 150 \text{ см}^{-1}$ [23; 46–48], поскольку там наблюдаются только два достаточно широких пика (около 196 и 247 см^{-1}), природа которых связана не с классическим механизмом неупругого рассеяния света на фононах, а с особенностями строения энергетических зон Cd_3As_2 и взаимодействием

носителей заряда с фотонами, учитывающим межзонные и внутризонные переходы [45].

Дисперсионный анализ для пленок с большей кристалличностью ($\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$;

$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) был выполнен с применением функции Войта (рис. 6, вставка). Результаты расчета частоты основных мод приведены в таблице 3.

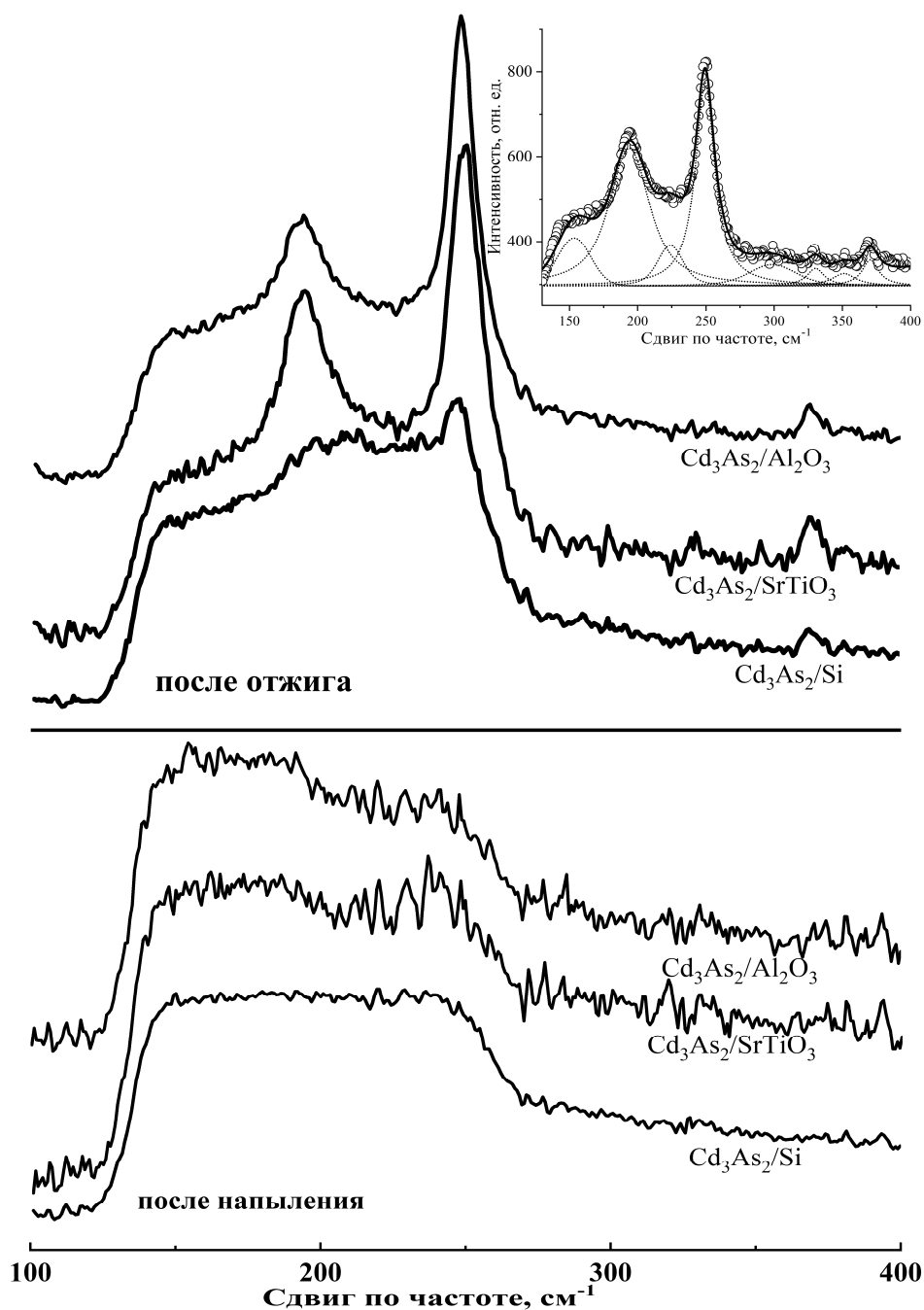


Рис. 6. Спектры КРС пленок Cd_3As_2 , напыленных на различные подложки. Вставка: пример разложения спектра КРС отожженной пленки $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$ на отдельные колебательные моды

Fig. 6. Raman spectra of Cd_3As_2 films deposited on various substrates. Insert: an example of the decomposition of the Raman spectrum of an annealed $\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$ film into separate vibrational modes

Таблица 3. Дисперсионный анализ спектров КРС магнетронных пленок Cd_3As_2 на различных подложках (I – до отжига, II – после отжига), cm^{-1}

Table 3. Dispersion analysis of the Raman spectra of Cd_3As_2 magnetron films on various substrates (I, before annealing; II, after annealing), cm^{-1}

$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Si}$				$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$				$\text{Cd}_3\text{As}_2/\text{SrTiO}_3$			
I		II		I		II		I		II	
x_c	w	x_c	w	x_c	w	x_c	w	x_c	w	x_c	w
153.0	28.6	155.2	35.0	154	30.7	153.5	26.2	151.1	28.6	153.4	28.5
188.1	28.5	201.1	50.3	196.2	34.6	193.2	31.9	192.7	47.5	193.8	28.0
225.5	103.3	—	—	220.5	1	—	—	217.8	74.9	223.9	15.8
243.5	30.6	244.8	40.5	248.4	34.5	248.1	18.0	244.1	41.8	249.4	17.1
—	—	—	—	289.3	41.6			302.4	49.0	298.7	31.2

Примечание. Положение моды обозначается x_c , а сила осциллятора – w.

Обращает на себя внимание существенное уширение основных колебательных мод в неотожженных образцах, что говорит об их аморфизации и очень высокой дефектности кристаллической структуры, которая значительно снижается после отжига. Об этом же свидетельствует то, что при частотах выше 250 cm^{-1} в отожженных образцах начинают идентифицироваться более слабые моды, которые, скорее всего, являются проявлением суммарных колебаний кристаллической решетки. Также хорошо видно, что дефектность пленок Cd_3As_2 на подложке Si с поверхностным аморфным слоем SiO_2 после отжига снижается намного слабее, чем на монокристаллических подложках из сапфира или титаната стронция.

Выводы

1. Методом магнетронного неактивного высокочастотного напыления получены пленки дираковского полуметалла арсенида кадмия на подложках из кремния с естественным оксидным слоем, сапфира и титаната стронция.

2. Комплексом методов установлено, что аморфизация пленок зависит как от кристалличности подложки, так и от последующего за процедурой напыления отжига пленок в инертной атмосфере.

3. При высокотемпературном отжиге пленки частично кристаллизуются. Ось текстурирования не зависит от типа подложки и совпадает с осью (112) монокристаллического $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$.

Список литературы

1. Ultrahigh mobility and giant magnetoresistance in the Dirac semimetal Cd_3As_2 / T. Liang, Q. Gibson, M. N. Ali, M. Liu, R. J. Cava, N. P. Ong // Nature materials. 2015. Vol. 14, no. 3. P. 280–284.
2. 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : A review of material properties / I. Crassee, R. Sankar, W. L. Lee, A. Akrap, M. Orlita // Physical Review Materials. 2018. Vol. 2, no. 12. P. 120302.
3. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 / Z. Wang, H. Weng, Q. Wu, X. Dai, Z. Fang // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. P. 125427.
4. Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal / S. Borisenko, Q. Gibson, D. Evtushinsky, V. Zabolotnyy, B. Büchner, R. J. Cava // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. P. 027603.
5. Two-dimensional Dirac fermions in thin films of Cd_3As_2 / L. Galletti, T. Schumann, O. F. Shoron, M. Goyal, D. A. Kealhofer, H. Kim, S. Stemmer // Phys. Rev. B. 2018. Vol. 97. P. 115132.

6. Walowski J., Muzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120. P. 140901.
7. Anomalous Nernst effect in the Dirac semimetal Cd_3As_2 / T. Liang, J. Lin, Q. Gibson, T. Gao, M. Hirschberger, M. Liu, R. J. Cava, N. P. Ong // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 118, no. 13. P. 136601-1 – 136601-5.
8. Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2 / M. Uchida, Y. Nakazawa, S. Nishihaya, K. Akiba, M. Kriener, Y. Kozuka, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, N. Nagaosa, Y. Tokura, M. Kawasaki // *Nature communications*. 2017. Vol. 8, no. 1. P. 2274-1 – 2274-7.
9. Observation of a three-dimensional topological Dirac semimetal phase in high-mobility Cd_3As_2 / M. Neupane, S. Y. Xu, R. Sankar, N. Alidoust, G. Bian, C. Liu, I. Belopolski, T. R. Chang, H. T. Jeng, H. Lin, A. Bansil, F. Chou, M. Z. Hasan // *Nature communications*. 2014. Vol. 5. P. 3786-1 – 3786-8.
10. Giant negative magnetoresistance induced by the chiral anomaly in individual Cd_3As_2 nanowires / C. Z. Li, L. X. Wang, H. Liu, J. Wang, Z. M. Liao, D. P. Yu // *Nature Communications*. 2015. Vol. 6. P. 10137-1 – 10137-7.
11. Transport evidence for Fermi-arc-mediated chirality transfer in the Dirac semimetal Cd_3As_2 / J. W. M. Philip, L. N. Nityan, H. Toni, C.P. Andrew, I. Kimchi, A. Vishwanath, J. G. Analytis // *Research letter*. 2016. Vol. 535, no. 7611. P. 266–270.
12. Thermoelectric signature of the chiral anomaly in Cd_3As_2 / Z. Jia, C. Li, X. Li, J. Shi, Z. Liao, D. Yu, X. Wu // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. P. 13013-1 – 13013-6.
13. Probing the chiral anomaly by planar Hall effect in Dirac semimetal Cd_3As_2 nanoplates / M. Wu, G. Zheng, W. Chu, Y. Liu, W. Gao, H. Zhang, J. Lu, Y. Han, J. Zhou, W. Ning, M. Tian // *Physical review B*. 2018. Vol. 98. P. 161110-1 – 161110-5.
14. Fu C., Sun Y., Felser C. Topological thermoelectrics // *APL Materials*. 2020. Vol. 8, no. 4. P. 040913. <https://doi.org/10.1063/5.0005481>.
15. Ultrafast photothermoelectric effect in dirac semimetallic Cd_3As_2 revealed by terahertz emission / W. Lu, Z. Fan, Y. Yang, J. Ma, J. Lai, X. Song, X. Zhuo, Z. Xu, J. Liu, X. Hu, S. Zhou, F. Xiu // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 1623. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29168-w>.
16. Manifestation of kinetic inductance in terahertz plasmon resonances in thin-film Cd_3As_2 / A. Chanana, N. Lotfizadeh, Q. H. O. Condorie, P. Gopalan, J. R. Winger, S. Blair, A. Nahata, V. V. Deshpande, M. A. Scarpulla, B. Sensale-Rodriguez // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13, no. 4. P. 4091–4100. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08649>.
17. Gate-enhanced broadband photodetection based on Cd_3As_2 /graphene Dirac heterojunctions / X. Liao, C. Xu, Z.-P. Fan, Y.-Y. Lan, N. Li, C.-G. Chu, A.-Q. Wang, D. Sun, Z.-M. Liao // *Applied Physics Letters*. 2023. Vol. 122, no. 3. P. 031105. <https://doi.org/10.1063/5.0139561>.
18. Ferromagnetic state above room temperature in a proximitized topological Dirac semimetal / M. Uchida, T. Koretsune, S. Sato, M. Kriener, Y. Nakazawa, S. Nishihaya, Y. Taguchi, R. Arita, M. Kawasaki // *Phys. Rev. B*. 2019. Vol. 100, no. 24. P. 245148-1 – 245148-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245148>.
19. Pressure-induced superconductivity in the three-dimensional topological Dirac semimetal Cd_3As_2 / L. He, Y. Jia, S. Zhang, X. Hong, C. Jin, S. Li // *NPJ Quantum Materials*. 2016. Vol. 1. P. 16014.
20. Observation of superconductivity induced by a point contact on 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 crystals / W. He, W. Huichao, L. Haiwen, L. Hong, Y. Wuhao, J. Shuang, L. Xiong-Jun, X. C. Xie, W. Jian, W. Jian // *Nature materials*. 2016. Vol. 15, no. 1. P. 38–42.

21. Unconventional superconductivity at mesoscopic point contacts on the 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 / L. Aggarwal, A. Gaurav, G. S. Thakur, Z. Haque, A. K. Ganguli, G. Sheet // *Nature materials*. 2015. Vol. 15, no. 1. P. 32–37.
22. Gate modulation of anisotropic superconductivity in Al-Dirac semimetal Cd_3As_2 nanoplate-Al Josephson junctions / N. Li, Z. B. Tan, J. J. Chen, T. Y. Zhao, C. G. Chu, A. Q. Wang, Z. C. Pan, D. Yu, Z. M. Liao // *Superconductor Science and Technology*. 2022. Vol. 35, no. 4. P. 044003.
23. Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films / A. V. Suslov, A. B. Davydov, L. N. Oveshnikov, L. A. Morgun, K. I. Kugel, V. S. Zakhvalinskii, E. A. Pilyuk, A. V. Kochura, A. P. Kuzmenko, V. M. Pudalov, B. A. Aronzon // *Physical Review B*. 2019. Vol. 99, is. 9. P. 094512.
24. Superconductivity and Shubnikov - de Haas effect in polycrystalline Cd_3As_2 thin films / L. N. Oveshnikov, A. B. Davydov, A. V. Suslov, A. I. Ril, S. F. Marenkin, A. L. Vasiliev, B. A. Aronzon // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, is. 1. P. 4601.
25. Induced superconductivity in the two-dimensional topological insulator phase of cadmium arsenide / A. Rashidi, R. Kealhofer, A. C. Lygo, V. Huang, S. Stemmer // *APL Materials*. 2023. Vol. 11, no. 41. P. 041117.
26. Morphology and optical properties of thin Cd_3As_2 films of a Dirac semimetal compound / N. Kovaleva, L. Fekete, D. Chvostova, A. Muratov // *Metals*. 2020. Vol. 10, is. 10. P. 1398.
27. Two-dimensional topological insulator state in cadmium arsenide thin films / A. C. Lygo, B. Guo, A. Rashidi, V. Huang, P. Cuadros-Romero, S. Stemmer // *Physical Review Letters*. 2023. Vol. 130, no. 427. P. 046201.
28. Jurusik J. The columnar microstructure of amorphous cadmium arsenide thin films // *Thin Solid Films*. 1994. Vol. 248. P. 178–183.
29. Получение и свойства тонких пленок Cd_3As_2 и Zn_3P_2 / Н. С. Жалилов, В. П. Саныгин, А. М. Квердаков, О. Н. Пашкова // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1990. Т. 26, вып. 9. С. 1975–1976.
30. Molecular beam epitaxy of three-dimensionally thick Dirac semimetal Cd_3As_2 films / Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, S. Sato, A. Nakao, J. Matsuno, M. Kawasaki // *APL Materials*. 2019. Vol. 7. P. 071109.
31. Molecular beam epitaxy of Cd_3As_2 on a III-V substrate / T. Schumann, M. Goyal, H. Kim, S. Stemmer // *APL Materials*. 2016. Vol. 4. P. 126110.
32. Dubowski J. J., Williams D. F. Pulsed laser evaporation of Cd_3As_2 // *Applied Physics Letters*. 1984. Vol. 44. P. 339.
33. Синтез магнетронным распылением и структура тонких пленок арсенида кадмия / А. В. Кочура, В. С. Захвалинский, Зо Хтет Аунг, А. И. Риль, Е. А. Пилюк, А. П. Кузьменко, Б. А. Аронзон, С. Ф. Маренкин // *Неорганические материалы*. 2019. Т. 55, no. 9. С. 933–940.
34. Effect of Cd/As flux ratio and annealing process on the transport properties of Cd_3As_2 films grown by molecular beam epitaxy / S. X. Zhang, J. Zhang, Y. Wu, T. T. Kang, N. Li, X. F. Qiu, P. P. Chen // *Materials Research Express*. 2020. Vol. 7. P. 106405.
35. Ориентированные пленки полупроводниковых соединений Zn_3As_2 и Cd_3As_2 на сапфировых подложках / Н. С. Жалилов, В. П. Саныгин, Г. С. Юрьев, С. Ф. Маренкин, В. Б. Лазарев // *Журнал неорганической химии*. 1992. Т. 37, № 9. С. 1950–1954.
36. Cadmium arsenide films prepared by pulsed laser evaporation: electrical properties and lattice parameters / J. J. Dubowski, P. Norman, P. B. Sewell, D. F. Williams, F. Krolicki, M. Lewicki // *Thin Solid Films*. 1987. Vol. 147. P. L-51 – L-54.
37. Сверхпроводимость в тонких пленках дираковского полуметалла Cd_3As_2 / А. Б. Давыдов, Л. Н. Овешников, А. В. Суслов, А. И. Риль, С. Ф. Маренкин, Б. А. Аронзон // *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62, № 3. С. 369–372.

38. Structural characterization of high-mobility Cd_3As_2 films crystallized on SrTiO_3 / Y. Nakazawa, M. Uchida, Sh. Nishihaya, M. Kriener, Yu. Kozuka, Y. Taguchi, M. Kawasaki // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. P. 2244.
39. Din M., Gould R. D. Van der Pauw resistivity measurements on evaporated thin films of cadmium arsenide, Cd_3As_2 // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. P. 5508–5511.
40. Ril A. I., Marenkin S. F. Cadmium arsenides: structure, synthesis of bulk and film crystals, magnetic and electrical properties (Review) // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2021. Vol. 66, no. 14. P. 2005–2016.
41. Тензиметрические исследования сублимации Cd_3As_2 / Г. Д. Нипан, Я. Х. Гринберг, В. Б. Лазарев // *Журнал физической химии*. 1989. Т. 63, № 2. С. 325–328.
42. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
43. О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности / В. М. Самсонов, Ю. В. Кузнецова, Е. В. Дьякова // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 2. С. 71 – 77.
44. Структурирование магнетронных нанопленок Zr при отжиге $T_D < T_{an} < T_m$ в атмосфере / А. П. Кузьменко, Тант Син Вин, Мьо Мин Тан, А. В. Кузько, Нау Динт // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 2. С. 133–150.
45. Some aspects of raman scattering in Cd_3As_2 single crystals / J. Weszka, M. I. Renucc, A. Zwick // *Physics Status Solidi (B)*. 1986. Vol. 133. P. 57.
46. Schönherr P., Hesjedal T. Structural properties and growth mechanism of Cd_3As_2 nanowires // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 106. P. 013115.
47. Thickness-dependent quantum oscillations in Cd_3As_2 thin films / P. Cheng, C. Zhang, Y. Liu, X. Yuan, F. Song, Q. Sun, P. Zhou, D. W. Zhang, F. Xiu // *New J. Physics*. 2016. Vol. 18. P. 083003.
48. Vapor-phase synthesis and magnetoresistance of $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ ($x=0.007$) single crystals / A. V. Kochura, L. N. Oveshnikov, A. P. Kuzmenko, A. B. Davydov, S. Yu. Gavrilkin, V. S. Zakhvalinskii, V. A. Kulbachinskii, N. A. Khokhlov, B. A. Aronzon // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2019. Т. 109, № 3. С. 174–175.

References

1. Liang T., Gibson Q., Ali M. N., Liu M., Cava R. J., Ong N. P. Ultrahigh mobility and giant magnetoresistance in the Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature materials*, 2015, vol. 14, no. 3, pp. 280–284.
2. Crassee I., Sankar R., Lee W. L., Akrap A., Orlita M. 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 : A review of material properties. *Physical Review Materials*, 2018, vol. 2, no. 12, pp. 120302.
3. Wang Z., Weng H., Wu Q., Dai X., Fang Z. Three-dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd_3As_2 . *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 88, pp. 125427.
4. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., Zabolotnyy V., Büchner B., Cava R. J. Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal. *Phys. Rev. Lett*, 2014, vol. 113, pp. 027603.
5. Galletti L., Schumann T., Shoron O. F., Goyal M., Kealhofer D.A., Kim H., Stemmer S. Two-dimensional Dirac fermions in thin films of Cd_3As_2 . *Phys. Rev. B*, 2018, vol. 97, pp. 115132.
6. Walowski J., Muzenberg M. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, pp. 140901.
7. Liang T., Lin J., Gibson Q., Gao T., Hirschberger M., Liu M., Cava R. J., Ong N. P. Anomalous Nernst effect in the dirac semimetal Cd_3As_2 . *Physical Review Letters*, 2017, vol. 118, no. 13, pp. 136601-1 – 136601-5.

8. Uchida M., Nakazawa Y., Nishihaya S., Akiba K., Kriener M., Kozuka Y., Miyake A., Taguchi Y., Tokunaga M., Nagaosa N., Tokura Y., Kawasaki M. Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature communications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 2274-1 – 2274-7.
9. Neupane M., Xu S. Y., Sankar R., Alidoust N., Bian G., Liu C., Belopolski I., Chang T. R., Jeng H. T., Lin H., Bansil A., Chou F., Hasan M. Z. Observation of a three-dimensional topological Dirac semimetal phase in high-mobility Cd_3As_2 . *Nature communications*, 2014, vol. 5, pp. 3786-1 – 3786-8.
10. Li C. Z., Wang L. X., Liu H., Wang J., Z. Liao M., Yu D. P. Giant negative magnetoresistance induced by the chiral anomaly in individual Cd_3As_2 nanowires. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, pp. 10137-1 – 10137-7.
11. Philip J. W. M., Nityan L. N., Toni H., Andrew C.P., Kimchi I., Vishwanath A., Analytis J. G. Transport evidence for Fermi-arc-mediated chirality transfer in the Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Research letter*, 2016, vol. 535, no. 7611, pp. 266–270.
12. Jia Z., Li C., Li X., Shi J., Liao Z., Yu D., Wu X. Thermoelectric signature of the chiral anomaly in Cd_3As_2 . *Nature Communications*, 2016, vol. 7, pp. 13013-1 – 13013-6.
13. Wu M., Zheng G., Chu W., Liu Y., Gao W., Zhang H., Lu J., Han Y., Zhou J., Ning W., Tian M. Probing the chiral anomaly by planar Hall effect in Dirac semimetal Cd_3As_2 nanoplates. *Physical review B*, 2018, vol. 98, pp. 161110-1 – 161110-5.
14. Fu C., Sun Y., Felser C. Topological thermoelectrics. *APL Materials*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 040913. <https://doi.org/10.1063/5.0005481>
15. Lu W., Fan Z., Yang Y., Ma J., Lai J., Song X., Zhuo X., Xu Z., Liu J., Hu X., Zhou S., Xiu F. Ultrafast photothermoelectric effect in dirac semimetallic Cd_3As_2 revealed by terahertz emission. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1623. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29168-w>
16. Chanana A., Lotfizadeh N., Condorice Q. H. O., Gopalan P., Winger J. R., Blair S., Nahata A., Deshpande V. V., Scarpulla M. A., Sensale-Rodriguez B. Manifestation of kinetic inductance in terahertz plasmon resonances in thin-film Cd_3As_2 . *ACS Nano*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 4091–4100. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08649>
17. Liao X., Xu C., Fan Z. P., Lan Y. Y., Li N., Chu C. G., Wang A. Q., Sun D., Liao Z. M. Gate-enhanced broadband photodetection based on Cd_3As_2 /graphene Dirac heterojunctions. *Applied Physics Letters*, 2023, vol. 122, no. 3, pp. 031105. <https://doi.org/10.1063/5.0139561>
18. Uchida M., Koretsune T., Sato S., Kriener M., Nakazawa Y., Nishihaya S., Taguchi Y., Arita R., Kawasaki M. Ferromagnetic state above room temperature in a proximitized topological Dirac semimetal. *Phys. Rev. B*, 2019, vol. 10, no. 24, pp. 245148-1 – 245148-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.245148>
19. He L., Jia Y., Zhang S., Hong X., Jin C., Li S. Pressure-induced superconductivity in the three-dimensional topological Dirac semimetal Cd_3As_2 . *NPJ Quantum Materials*, 2016, vol. 1, pp. 16014.
20. He W., Huichao W., Haiwen L., Hong L., Wuhao Y., Shuang J., Xiong-Jun L., Xie X. C., Jian W., Jian W. Observation of superconductivity induced by a point contact on 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 crystals. *Nature materials*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 38–42.
21. Aggarwal L., Gaurav A., Thakur G. S., Haque Z., Ganguli A. K., Sheet G. Unconventional superconductivity at mesoscopic point contacts on the 3D Dirac semimetal Cd_3As_2 . *Nature materials*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 32–37.
22. Li N., Tan Z. B., Chen J. J., Zhao T. Y., Chu C. G., Wang A. Q., Pan Z. C., Yu D., Liao Z. M. Gate modulation of anisotropic superconductivity in Al-Dirac semimetal Cd_3As_2 nanoplate-Al Josephson junctions. *Superconductor Science and Technology*, 2022, vol. 35, no. 4, pp. 044003.

23. Suslov A. V., Davydov A. B., Oveshnikov L. N., Morgun L. A., Kugel K. I., Zakhvalinskii V. S., Pilyuk E. A., Kochura A. V., Kuzmenko A. P., Pudalov V. M., Aronzon B. A. Observation of subkelvin superconductivity in Cd_3As_2 thin films. *Physical Review B*, 2019, vol. 99, is. 9, pp. 094512.
24. Oveshnikov L. N., Davydov A. B., Suslov A. V., Ril A. I., Marenkin S. F., Vasiliev A. L., Aronzon B. A. Superconductivity and Shubnikov - de Haas effect in polycrystalline Cd_3As_2 thin films. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, is. 1, pp. 4601.
25. Rashidi A., Kealhofer R., Lygo A. C., Huang V., Stemmer S. Induced superconductivity in the two-dimensional topological insulator phase of cadmium arsenide. *APL Materials*, 2023, vol. 11, no. 41, pp. 041117.
26. Kovaleva N., Fekete L., Chvostova D., Muratov A. Morphology and optical properties of thin Cd_3As_2 films of a Dirac semimetal compound. *Metals*, 2020, vol. 10, is. 10, pp. 1398.
27. Lygo A. C., Guo B., Rashidi A., Huang V., Cuadros-Romero P., Stemmer S. Two-dimensional topological insulator state in cadmium arsenide thin films. *Physical Review Letters*, 2023, vol. 130, no. 427, pp. 046201.
28. Jurusik J. The columnar microstructure of amorphous cadmium arsenide thin films. *Thin Solid Films*, 1994, vol. 248, pp. 178–183.
29. Jalilov N. S., Sanygin V. P., Kverdakov A. M., Pashkova O. N. Poluchenie i svoistva tonkikh plenok Cd_3As_2 i Zn_3P_2 [Synthesis and properties of Cd_3As_2 and Zn_3P_2 thin films]. *Izvestiya AN SSSR. Neorganicheskie materialy = Proceedings AN SSSR. Inorganic Materials*, 1990, vol. 26, is. 9, pp. 1975–1976.
30. Nakazawa Y., Uchida M., Nishihaya S., Sato S., Nakao A., Matsuno J., Kawasaki M. Molecular beam epitaxy of three-dimensionally thick Dirac semimetal Cd_3As_2 films. *APL Materials*, 2019, vol. 7, pp. 071109.
31. Schumann T., Goyal M., Kim H., Stemmer S. Molecular beam epitaxy of Cd_3As_2 on a III-V substrate. *APL Materials*, 2016, vol. 4, pp. 126110.
32. Dubowski J. J., Williams D. F. Pulsed laser evaporation of Cd_3As_2 . *Applied Physics Letters*, 1984, vol. 44, pp. 339.
33. Kochura A. V., Zakhvalinskii V. S., Htet Aung Zaw, Ril A. I., Pilyuk E. A., Kuz'menko A. P., Aronzon B. A., Marenkin S. F. Sintez magnetronnym raspyleniem i struktura tonkikh plenok arsenida kadmiya [Growth of Thin Cadmium Arsenide Films by Magnetron Sputtering and Their Structure]. *Neorganicheskie materialy = Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, iss. 9, pp. 879–886.
34. Zhang S. X., Zhang J., Wu Y., Kang T. T., Li N., Qiu X. F., Chen P. P. Effect of Cd/As flux ratio and annealing process on the transport properties of Cd_3As_2 films grown by molecular beam epitaxy. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, pp. 106405.
35. Jalilov N. S., Sanygin V. P., Juriev G. S., Marenkin S. F., Lasarev V. B. Orientirovannye plenki poluprovodnikovykh soedinenii Zn_3As_2 i Cd_3As_2 na sapfirovykh podlozhkakh [Oriented films of Zn_3As_2 and Cd_3As_2 semiconductor compounds on sapphire substrates]. *Zhurnal Neorganicheskoi khimii = Journal of Inorganic Chemistry*, 1992, vol. 37, vol. 9, pp. 1950–1954.
36. Dubowski J. J., Norman P., Sewell P. B., Williams D. F., Krolicki F., Lewicki M. Cadmium arsenide films prepared by pulsed laser evaporation: electrical properties and lattice parameters. *Thin Solid Films*, 1987, vol. 147, pp. L-51 – L-54.
37. Davydov A. B., Oveshnikov L. N., Suslov A. V., Ril A. I., Marenkin S. F., Aronzon B. A. Sverkhprovodimost' v tonkikh plenках dirakovskogo polumetalla Cd_3As_2 . [Superconductivity in Thin Films of the Dirac Semimetal Cd_3As_2]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2020, vol. 62, is. 3, pp. 419-422.

38. Nakazawa Y., Uchida M., Nishihaya Sh., Kriener M., Kozuka Yu., Taguchi Y., Kawasaki M. Structural characterization of high-mobility Cd_3As_2 films crystallized on SrTiO_3 . *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 2244.
39. Din M., Gould R.D. Van der Pauw resistivity measurements on evaporated thin films of cadmium arsenide, Cd_3As_2 . *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, pp. 5508–5511.
40. Ril A. I., Marenkin S. F. Cadmium arsenides: structure, synthesis of bulk and film crystals, magnetic and electrical properties (Review). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, vol. 66, no. 14, pp. 2005–2016.
41. Nipan G. D., Grinberg Ya. H., Lasarev V. B. Tenzimetrichekie issledovaniya sublimatsii Cd_3As_2 [Tensimetric studies of Cd_3As_2 sublimation]. *Zhurnal fizicheskoi khimii = Journal of Physical Chemistry*, 1989, vol. 63, is. 2, pp. 325–328.
42. Feder J. Fraktaly [Fractals]. Moscow, Mir Publ., 1991. 254 p.
43. Samsonov V. M., Kuznetsova Yu. V., D'yakova E. V. O fraktal'nykh svoistvakh agregatov metallicheskih nanoklasteroi na tverdoi poverkhnosti [Fractal properties of aggregates of metal nanoclusters on solid surface]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 2, pp. 71–77.
44. Kuzmenko A. P., Thant Sin Win, Myo Min Than, Kuzko A. V., Naw Dint. Strukturirovanie magnetronnykh nanoplenok Zr pri otzhige $T_D < T_{an} < T_m$ v atmosfere [Structuring of Magnetron Zr nanofilms Upon Annealing $T_D < T_{an} < T_m$ in the Atmosphere]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11(2), pp. 133–150.
45. Weszka J., Renucc M. I., Zwick A. Some aspects of raman scattering in Cd_3As_2 single crystals. *Physics Status Solidi (B)*, 1986, vol. 133, pp. 57.
46. Schönherr P., Hesjedal T. Structural properties and growth mechanism of Cd_3As_2 nanowires. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 106, pp. 013115.
47. Cheng P., Zhang C., Liu Y., Yuan X., Song F., Sun Q., Zhou P., Zhang D. W., Xiu F. Thickness-dependent quantum oscillations in Cd_3As_2 thin films. *New J. Physics*, 2016, vol. 18, pp. 083003.
48. Kochura A. V., Oveshnikov L. N., Kuzmenko A. P., Davydov A. B., Gavrilkin S. Yu., Zakhvalinskii V. S., Kulbachinskii V. A., Khokhlov N. A., Aronzon B. A. Vapor-phase synthesis and magnetoresistance of $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ ($x=0.007$) single crystals. *JETP Letters*, 2019, vol. 109, no. 3, pp. 175–179.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кочура Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: akochura@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-7941-8404

Aleksey V. Kochura, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Head for Research of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: akochura@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-7941-8404

Зо Хтет Аунг, аспирант кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zawh0898@gmail.com

Zaw Htet Aung, Post-Graduate Student of the Department of the of Nanotechnology and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zawh0898@gmail.com

Захвалинский Василий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru, ORCID: 0000-0001-7055-8243

Vasily S. Zakhvalinsky, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru, ORCID: 0000-0001-7055-8243

Пилук Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики института инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: pilyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4979-5724

Evgenii A. Pilyuk, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics of the Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: pilyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4979-5724

Кочура Евгения Павловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ekochura@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7735-5393

Evgeniya P. Kochura, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Programm Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ekochura@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7735-5393

Риль Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории полупроводниковых и диэлектрических материалов, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: ril_alexey@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7745-2529

Aleksey Yu. Ril, Junior Researcher, Laboratory of Semiconductor and Dielectric Materials of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: ril_alexey@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7745-2529

Виктор Михайлович Емельянов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vmemelianov@yandex.ru

Victor M. Emelaynov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vmemelianov@yandex.ru