

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 93–105

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 93–105

<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

Научная статья
УДК 620.3:29.19.31

Перспективы создания и использования гетерофазного материала CdS-FeS, полученного с применением метода Ленгмюра–Блоджетт

С. В. Стецюра[✉], П. Г. Харитонова, А. В. Козловский

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Стецюра Светлана Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, stetsyurasv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4337-012X>, AuthorID: 443504

Харитонова Полина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, haritonovapg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0591-9908>, AuthorID: 877137

Козловский Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, kozlowsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

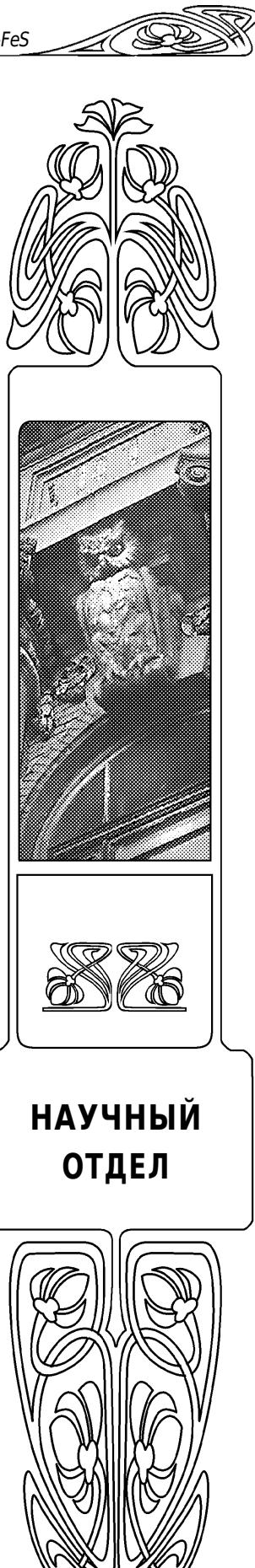
Аннотация. Представлены результаты исследований по получению полумагнитного полупроводника с помощью технологии Ленгмюра–Блоджетт на основе полупроводниковой пластины CdS. В результате проведенных исследований материала в процессе получения с помощью анализа изотерм сжатия, а также методами атомно-силовой микроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии и энергодисперсионного анализа можно утверждать, что метод получения материала CdS:Fe, обладающего свойствами полумагнитного полупроводника, при использовании метода Ленгмюра–Блоджетт полностью воспроизводим, позволяет создавать гетерофазный материал с нановключениями фазы FeS. Показано, что полученный материал обладает уникальными свойствами, такими как повышенная фоточувствительность и отрицательная фотоутомляемость, что весьма перспективно при создании устройств, работающих в условиях постоянного интенсивного освещения и чьи характеристики могут настраиваться и регулироваться освещением.

Ключевые слова: сульфиды кадмия и железа, полумагнитный полупроводниковый материал, метод Ленгмюра–Блоджетт, атомно-силовая микроскопия, фотоэлектрические характеристики, отрицательная фотоутомляемость

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00194, <https://rscf.ru/project/22-22-00194/>).

Для цитирования: Стецюра С. В., Харитонова П. Г., Козловский А. В. Перспективы создания и использования гетерофазного материала CdS-FeS, полученного с применением метода Ленгмюра–Блоджетт // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 93–105. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Article

Perspectives for the creation and application of heterophase material CdS-FeS obtained by the Langmuir-Blodgett method

S. V. Stetsyura[✉], P. G. Kharitonova, A. V. Kozlowski

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Svetlana V. Stetsyura, Stetsyurasv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4337-012X>, AuthorID: 443504

Polina G. Kharitonova, haritonovapg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0591-9908>, AuthorID: 877137

Alexander V. Kozlowski, kozlowsky@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3612-9776>, AuthorID: 790112

Abstract. Background and Objectives: Cadmium sulfide (CdS) is one of the most promising materials for photovoltaic devices, but it is increasingly used as part of complex heterostructures and heterophase materials that provide expanded functionality and perspective for use. This article presents the results of studies on the production of semi-magnetic semiconductor material CdS-FeS, conventionally designated CdS:Fe, using the Langmuir-Blodgett technology. The morphology of the surface layers and the photoelectric characteristics of the obtained material are considered in detail in comparison with the original sample. **Methods:** A nanosized coating of iron arachinate (ArchFe) was prepared on the surface of CdS using the Langmuir-Blodgett method. The parameters of ArchFe monolayers were controlled using compression isotherms. The CdS/ArchFe structure was annealed in air. Energy-dispersive analysis and mass spectrometric studies were carried out to control the current processes before and after annealing. The main methods for studying hybrid structures of CdS/ArchFe and heterophase material CdS:Fe were atomic force microscopy and analysis of photoelectric characteristics using steady-state and kinetic approaches. **Results:** The resulting material is a matrix of $\text{Cd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ solid solution with nanoinclusions of the FeS phase. Analysis of atomic force microscopy images has confirmed the high reproducibility of the proposed method. We have shown the occurrence of the effect of "negative photofatigue" and an increase in integral photosensitivity by 70 times for a heterophase sample compared to "pure" CdS. **Conclusion:** It has been shown that the resulting material has unique properties, such as increased photosensitivity and negative photofatigue, which is very perspective for creating devices that can operate in conditions high illumination and whose characteristics can be controlled by illumination.

Keywords: cadmium and iron sulfides, semi-magnetic semiconductor material, Langmuir-Blodgett method, atomic force microscopy, photoelectric characteristics, negative photofatigue

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00194, <https://rscf.ru/en/project/22-22-00194/>).

For citation: Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Kozlowski A. V. Perspectives for the creation and application of heterophase material CdS-FeS obtained by the Langmuir-Blodgett method. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 93–105 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-93-105>, EDN: QNRMSZ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В ряду фоточувствительных полупроводников типа A₂B₆ сульфид кадмия (CdS) сам по себе остается одним из наиболее перспективных и востребованных материалов для приборов фотовольтаики [1], но все чаще его применяют в составе сложных гетероструктур, гетерофазных материалов [2–4] или твердых растворов [5], дающих расширенные функциональные возможности и перспективы использования. Причем исследователями широко изучаются как классические планарные структуры на основе материалов A₂B₆, так и более сложные наноструктурированные системы, например, такие как островковые покрытия [6, 7], покрытия на основе наночастиц, квантовых точек [3, 8] и нанострежней [9]. Если достоинством классического планарного подхода является технологическая простота получения и наличие отработанных методов получения, то при использовании второго подхода зачастую отмечаются лучший КПД использования светового потока и большая фото- и энергоэффективность [10]. При использовании CdS в качестве

основы для материалов фотодатчиков различного типа, а также в качестве основы для формирования солнечных батарей ряд исследователей [10] сумели получить значительное усиление фоточувствительности и энергоэффективности путем модификации поверхности CdS органическим слоем, в частности, нитроцеллюлозой [11]. Этот эффект объяснили уменьшением влияния поверхностных вакансий серы за счет их пассивации. Ранее [1] было показано увеличение фоточувствительности и радиационной стойкости CdS, модифицированных свинецсодержащими кластерами, полученными, в том числе с помощью органических покрытий. Влияние свинецсодержащих кластеров на фотоэлектрические характеристики CdS рассмотрели также авторы [12], отметив повышение эффективности солнечных батарей, созданных на основе такого гетерофазного материала.

Также было показано [13], что CdS имеет хорошие перспективы применения при добавлении магнитных атомов, например Fe, поскольку при определенных соотношениях компонентов

и технологии свойства получаемого гетерофазного материала соответствуют свойствам полумагнитного полупроводника (ПМП). ПМП – это относительно новый класс материалов, сочетающих в себе свойства обычных и магнитных полупроводников [14]. Это позволяет рассматривать материал CdS, легированный Fe (CdS:Fe), как перспективный материал для создания гетерофазных управляемых структур [15], так как под воздействием магнитного поля, и освещения в нём могут происходить обратимые изменения магнитных и фотоэлектрических свойств.

В работе [13] для создания ПМП CdS:Fe был использован метод термического испарения в вакууме, при котором на подложку последовательно наносились слои Fe и CdS, после чего образец отжигался на воздухе, и атомы Fe диффундировали в CdS с образованием твёрдого раствора замещения $Cd_xFe_{1-x}S$. Однако из-за низкой взаимной растворимости компонентов параллельно происходило образование преципитатов из атомов Fe, солей FeS и оксидов Fe_2O_3 . Для доказательства образования наноразмерных ферромагнитных фаз были исследованы ожеспектры и профили вторичной ионной масс-спектрометрии, показывающие распределения атомов S, Cd и Fe в образцах до и после отжига [13], измерялись кривые намагниченности полученных структур [16]. В проведённых экспериментах в [13, 16] полупроводниковая пленка CdS:Fe показала свойства классического ПМП, соединив в себе наличие отдельных атомов Fe в твёрдом растворе $Cd_xFe_{1-x}S$, обладающим парамагнитными свойствами, и наноразмерных фаз Fe_2O_3 и FeS, которым присущи ферромагнитные свойства.

Недостатками описанной в [13] технологии получения пленок CdS:Fe являются параметры и расположение слоя Fe. Такой слой не является ограниченным источником Fe, что не позволяет рассчитать параметры нановключений и их концентрацию в CdS с необходимой точностью. Кроме того, источник диффузии в этом случае располагается между инертной подложкой и фоточувствительным слоем, что приводит к росту концентрации преципитатов железа ближе к неосвещаемой стороне пленки CdS:Fe, снижая тем самым эффект от их наличия. Для устранения этих недостатков при создании источника диффузанта Fe для создания материала CdS:Fe представляется перспективным использование метода Ленгмюра–Блоджетт. При определенных условиях данный метод позволяет достаточно тонко

регулировать количество примеси в концентрациях, которые сложно контролировать при других технологиях [17]. Технология получения монослоев арахината железа (в дальнейшем, условно обозначаемом ArchFe) и перенесения их на твердые подложки была проработана нами в [18, 19].

Таким образом, целью данной работы является выявление морфологии и фотоэлектрических характеристик гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe.

1. Материалы и методы

1.1. Получение наноструктурированных железом органических слоев, их перенос на CdS и формирование гетерофазного материала CdS:Fe

В качестве фоточувствительной подложки для создания ПМП структур были взяты пластины монокристаллического CdS. Для получения покрытия, нанометровой толщины, являющегося источником Fe при диффузии, использовался метод Ленгмюра–Блоджетт, который позволяет переносить на поверхность подложки CdS атомы Fe в составе органического монослоя.

Для получения структурированных Fe монослоев арахиновая кислота разводилась в хлорформе до концентрации 0.001 моль/л и вводилась в объёме 50 мкл на поверхность водного раствора $FeCl_3$. Подбор концентрации $FeCl_3$ осуществлялся с учетом влияния pH раствора, так как многочисленными исследованиями показано, что pH раствора значительно влияет на степень ионизации молекул в нем, возможную кластеризацию атомов металла и итоговую плотность металла в созданном покрытии [20, 21].

Так, при значениях pH ~ 7 (для каждого вещества это значение немного варьируется) происходит ионизация, как правило, порядка 50% головных частей молекул. При сжатии монослоя за счет ионного взаимодействия происходит образование водородной связи, в результате чего структура монослоя упорядочивается, а площадь, приходящаяся на одну молекулу в плотноупакованном состоянии монослоя, уменьшается [20]. Увеличение концентрации ионов OH^- в субфазе приводит к росту вероятности разрыва O-H связи, что в процессе сжатия монослоев ведет к увеличению электростатических сил отталкивания между одноименно заряженными головными группами молекул и препятствует их сближению в монослое. В результате площадь, приходящаяся



на одну молекулу в плотноупакованном состоянии, увеличивается [20]. При уменьшении pH до значений pH ~ 3 происходит рост концентрации ионов H⁺, в результате чего значительно уменьшается вероятность разрыва O-H связи, что резко снижает эффективность образования водородных связей между головными частями молекул, и площадь, приходящуюся на одну молекулу в плотноупакованном состоянии, также возрастает [20, 21] в сравнении с площадями, характерными для «средних» значений pH. Поэтому при проведении исследований требуется установить оптимальное значение pH, при котором достигается плотная, наиболее упорядоченная упаковка органического металлизированного монослоя.

Для получения пленок Ленгмюра–Блоджетт была использована установка для нанесения монослоёв KSV-Nima LB Through Medium KN 2002 (KSV-Nima, Финляндия), снабженная двумя подвижными барьерами, которые обеспечивали симметричное двухстороннее сжатие монослоя со скоростью 25 мм/мин и с точностью определения площади, занимаемой монослоем, до 0.1%. Измерение поверхностного натяжения осуществлялось методом взвешивания пластины Вильгельми с точностью 0.01 мН/м. Перенос монослоя с поверхности субфазы на подложку осуществлялся в автоматическом режиме по методу Ленгмюра–Шеффера, что обусловлено соотношением геометрических размеров ванны и использованных образцов. В результате выполнения этого этапа формировались структуры CdS/ArchFe.

1.1.1. Методы контроля и исследования слоев ArchFe в процессе получения

Для контроля значения pH субфазы использовался буферный раствор на основе ацетата натрия, позволяющий фиксировать значение pH, оптимальное для однородного и достаточно плотного распределения Fe в монослое. С учетом результатов исследований [18], в которых проводилась апробация режимов получения на твердой подложке наноразмерных покрытий ArchFe, содержащих контролируемое количество атомов Fe, были выбраны следующие условия эксперимента: концентрация железосодержащей соли FeCl₃ 10⁻³ моль/л и pH водной субфазы 4.2 \pm 0.05. Эти условия обеспечивают максимальное встраивание атомов Fe в монослой арахиновой кислоты, но при этом отсутствует кластерообразование атомов Fe в монослое ArchFe, затрудняющее расчет

поверхностной концентрации атомов Fe и прогнозирование результатов диффузии Fe в CdS при последующем отжиге.

Параметры получаемых покрытий ArchFe, в частности плотность упаковки монослоя, контролировалась по изотермам сжатия, измеряемым в процессе сжатия монослоя ArchFe на поверхности водной субфазы.

В ходе процесса получения плотноупакованного монослоя контролировались температура, поверхностное давление π монослоя и средняя площадь A , приходящаяся на одну молекулу в монослое. Оптимальными технологическими параметрами являются: температура воздуха и субфазы 23 \pm 1°C и поверхностное давление 17 мН/м. Они поддерживались в процессе получения слоя постоянными, и при них проводился перенос железосодержащих монослоев на твердую подложку. В ходе эксперимента были получены следующие изотермы сжатия: на водной субфазе без добавления натрий-ацетатного буфера и FeCl₃, с добавлением буферного раствора, но без FeCl₃, с добавлением буферного раствора и FeCl₃ в водную субфазу. Типичные изотермы для каждой серии экспериментов показаны на рис. 1,

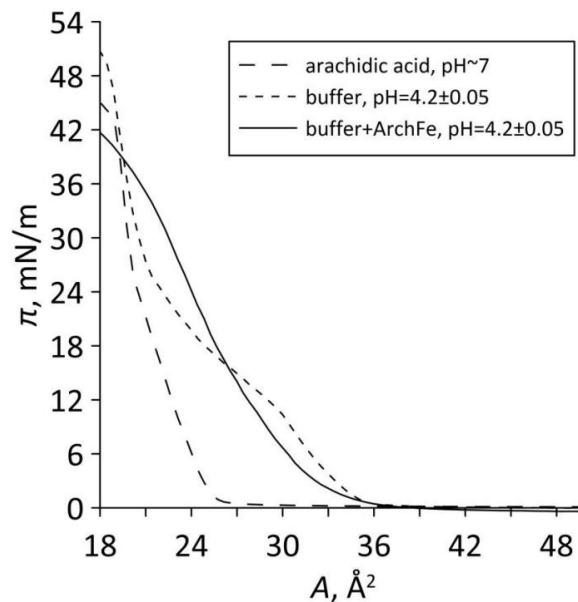


Рис. 1. Изотермы сжатия для монослоев арахиновой кислоты: на водной субфазе при pH ~ 7 , на водной субфазе при pH = 4.2 \pm 0.05, на субфазе водного раствора хлорида железа при pH = 4.2 \pm 0.05

Fig. 1. Compression isotherms for monolayers of arachidic acid on the aqueous subphase at pH ~ 7 , arachidic acid on the aqueous subphase at pH = 4.2 \pm 0.05, and arachidic acid on the subphase of an aqueous solution of ferric chloride at pH = 4.2 \pm 0.05

из которого следует, что за счет связывания катионов Fe с органическим монослоем произошли изменения изотерм сжатия, характерные для изменения pH субфазы и встраивания ионов металла в монослой [22].

Из рис. 1 следует, что значение относительной площади, приходящейся на одну молекулу арахиновой кислоты в плотноупакованной фазе, составляет 22.1 \AA^2 , при добавлении буфера она увеличилась до 23.7 \AA^2 , а в случае добавления и буфера, и FeCl_3 эта площадь увеличилась до 31.6 \AA^2 . Подобные изменения свидетельствуют о том, что значительная часть молекул монослоя арахиновой кислоты прореагировала с ионами Fe с образованием ArchFe.

Для количественной оценки качества переноса монослоя ArchFe на подложку CdS был рассчитан коэффициент переноса – отношение убыли площади монослоя (ΔS_{MC}) при однократном прохождении подложки сквозь монослой к площади твердой подложки ($S_{\text{подл}}$):

$$k = \frac{\Delta S_{\text{MC}}}{S_{\text{подл}}} = \frac{(S' - S'')}{S_{\text{подл}}}. \quad (1)$$

Убыль площади монослоя рассчитывалась как $\Delta S_{\text{MC}} = S' - S''$, где S' и S'' – площадь монослоя в момент начала переноса и после его окончания, соответственно. Были получены значения k в диапазоне 0.89–0.93, что свидетельствует о достоверном факте переноса на подложку монослоя удовлетворительного качества.

Количество перенесенных монослоев было доведено до 25, что обеспечило достаточную концентрацию Fe в органическом покрытии. Таким образом, были получены образцы CdS, поверхность которых модифицирована слоем ArchFe. Следующим этапом был отжиг образцов на воздухе при температуре $545 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 60 минут. В результате высокотемпературного отжига происходила диффузия атомов Fe вглубь CdS и был получен гетерофазный материал, условно обозначаемый CdS-FeS.

1.1.2. Методы контроля атомов железа на поверхности и в объеме CdS

Для определения процента Fe на поверхности структуры CdS/ArchFe до и после отжига был проведен энергодисперсионный анализ (ЭДА) образцов при помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия), оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40. ЭДА подтвердил, что

на поверхности неотожженного образца регистрируется Fe (около 3.8% от общего количества атомов приповерхностной области), причем процентное соотношение всех регистрируемых элементов на разных участках подложки примерно одинаковое, что означает равномерное распределение атомов Fe по поверхности CdS при нанесении покрытия. После отжига процент атомов Fe на поверхности существенно уменьшился (до 1.2%), что говорит о том, что Fe частично дифундировал в объем подложки, но часть его еще находится на поверхности.

Результаты масс-спектрометрических исследований, подтверждающих диффузию и распределение Fe, S, Cd и кислорода после отжига в образцах CdS:Fe приведены нами в [23]. В [13] было показано, что Fe при введении в CdS замещает атомы Cd, результатом чего является образование твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{S}$, но ввиду малой растворимости Fe в CdS также образуются наноразмерные преципитаты FeS, что и приводит к формированию гетерофазного материала CdS-FeS, обладающего свойствами ПМП.

1.2. Методы исследования гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe

Основными методами исследования гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe, были атомно-силовая микроскопия (ACM) и анализ фотоэлектрических характеристик с использованием стационарного и кинетического подходов.

Изображения ACM были получены на зондовой станции «NTEGRA-Spectra» (NT-MDT, Россия). Сканирование осуществлялось в полуконтактном режиме с помощью кантителевера FMG01/Pt с платиновым напылением, разрешение составляло 512×512 точек. Обработка данных проводились с помощью программного обеспечения Gwyddion 2.62. Анализ ACM-сканов может показать не только степень изменения морфологии поверхности после нанесения покрытия и его отжига, но и свидетельствовать об однородности нанесения, о процессах, произошедших на поверхности в результате отжига.

Для контроля изменения фотоэлектрических характеристик использовали зондовую станцию PM-5 Cascade Microtech с анализатором Agilent B1500A (Agilent Technologies, США). Для освещения использовалась галогенная лампа Motic MLK-150C с регулируемым уровнем мощности. Контактные площадки на поверхность образцов

не наносились, измерения осуществлялись с помощью вольфрамовых зондов, под которые для уменьшения вероятности повреждения поверхности подкладывались тонкие шайбочки индия фиксированного диаметра (~300 мкм). Расстояние между контактами поддерживалось постоянным ~800 мкм. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) при освещении и в темноте. Интерпретация хода ВАХ при освещении также может существенно зависеть от «предыстории» образца, например, длительности освещения до проведения измерений, а также от способа освещения – здесь можно выделить поперечную и продольную фотопроводимость [1], освещение с постоянной интенсивностью или импульсное. Максимальное количество информации из фотоэлектрических характеристик можно получить, применяя одновременно стационарный и кинетический подходы при их изучении.

Стационарный подход в наших исследованиях заключался в измерении ВАХ в трех «фиксированных точках»: в одинаковых условиях измерялись характеристики образца CdS с немодифицированной поверхностью, гибридной структуры CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe. Все измерения проводились в поперечном режиме фотопроводимости (при котором направления светового потока и линий напряженности электрического поля практически перпендикулярны), при одинаковой освещенности 20000 лк и в диапазоне напряжений от –10 до +10 В. Стационарный подход позволяет корректно оценивать итоговые изменения, произошедшие с образцом в результате модификации поверхности или отжига.

Кинетический подход дает возможность оценить скорость изменений параметров исследуемых образцов, имеющих различную «предысторию». Причем в этом случае возможно измерение фототока при фиксации рабочих параметров (напряжения, освещенности) или импульсное изменение одного из параметров во времени.

2. Результаты измерений и их обсуждение

Данный раздел содержит результаты экспериментальных исследований гибридных структур CdS/ArchFe и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структур CdS/ArchFe, проведенных с помощью ACM и измерения фотоэлектрических характеристик. Впервые представлены результаты для отожженных структур типа CdS:Fe с использованием стационарного и кинетического подходов.

2.1. Результаты ACM-измерений и их обсуждение

На рис. 2 представлены типичные сканы рельефа поверхности «чистого» CdS, CdS, модифицированного арахинатом железа (CdS/ArchFe) и гетерофазного материала, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe (CdS:Fe), для которых также находили значения статистических параметров, характеризующих рельеф поверхности (таблица).

Размер сканов (50×50 мкм) одинаков во всех случаях, что позволяет проводить корректное сравнение статистических параметров, характеризующих распределения высот. Указанный размер сканов достаточно хорошо отражают морфологию поверхности образцов в целом, при этом позволяя выделять изменения, происходящие на субмикронном уровне. Под каждым сканом показано распределение высот вдоль выделенной линии на скане, а на рис. 2, г представлены распределения высот рельефа, полученные сканированием изображений ACM, показанных на рис. 2, а–в соответственно. Распределения высот на рис. 2, г визуально приближены к распределению Гаусса, что подтверждают значения параметра асимметрии a , приведенного в таблице статистических параметров. Параметр a описывает форму функции распределения вероятности: он положителен, если правый «хвост» распределения длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Значения a для всех ACM-изображений близки к нулю, что в целом указывает на симметричность распределений, и, следовательно, на достаточно хорошую равномерность распределения высот неровностей на сканах.

Количественная оценка распределений с помощью параметров Sa и Sq позволяет определить специфику изображений и оценить произошедшие при модификации поверхности изменения. Средняя шероховатость Sa определяется как среднее арифметическое отклонение профиля от средней наклонной прямой или плоскости, проведенной методом наименьших квадратов. Среднеквадратичная шероховатость Sq характеризует среднеквадратичное отклонение профиля поверхности относительно базовой линии. Можно ожидать существенное расхождение этих параметров δ и увеличение значения Sa по сравнению с Sq :

$$\delta = \frac{(Sq - Sa)}{Sq} \cdot 100\%, \quad (2)$$

если на анализируемом скане имеются единичные локализованные, выделяющиеся на общем фоне неровности.

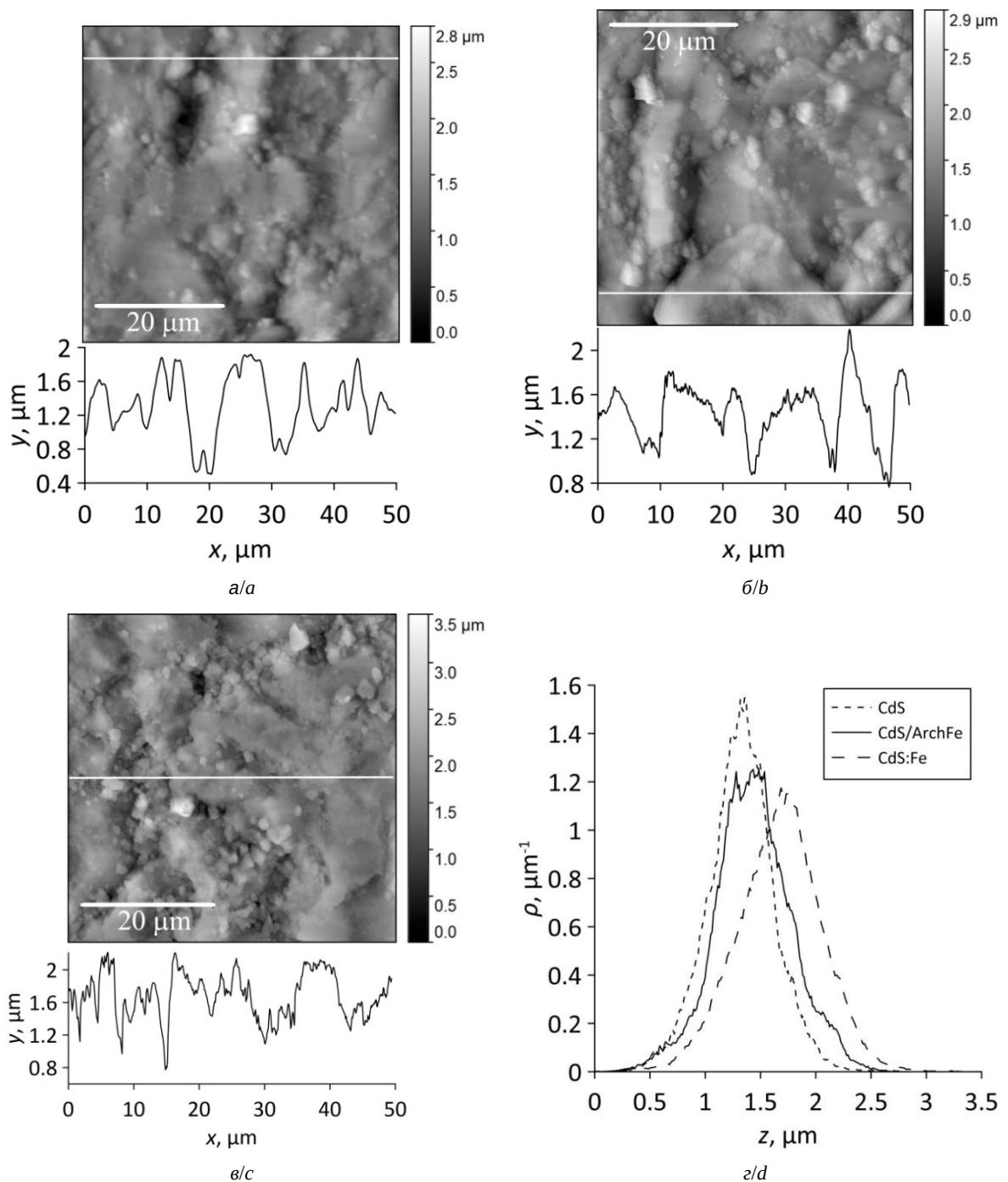


Рис. 2. ACM-изображения поверхности и профили вдоль линии для CdS (а), CdS/ArchFe до отжига (б) и гетерофазного материала CdS:Fe (в). Распределения высот неровностей для поверхностей CdS, CdS/ArchFe и CdS:Fe (г)

Fig. 2. AFM images of the surface and profiles along the line for CdS (a), CdS/ArchFe before annealing (b) and heterophase material CdS:Fe (c). Distributions of roughness heights for CdS, CdS/ArchFe and CdS:Fe surfaces (d)

При изменении значений Sa или Sq , связанных с нанесением покрытия или другой модификацией поверхности, слабое изменение этих величин говорит о том, что покрытие равномерно лежит на поверхности, практически повторяя его рельеф. Относительные изменения Sa и Sq

в процентах, полученные при переходе от анализа распределения высот на поверхности «чистого» CdS к анализу поверхности структуры с насыщенным покрытием CdS/ArchFe (до отжига), обозначим как Δ_1 . После отжига относительные изменения Sa и Sq поверхности гетерофазного

Статистические параметры АСМ изображений поверхностей «чистого» CdS, структуры с нанесенным покрытием CdS/ArchFe (до отжига) и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe
Statistical parameters of AFM images of the surfaces of “pure” CdS, a structure with a CdS/ArchFe coating (before annealing) and a heterophase CdS:Fe material obtained by annealing the CdS/ArchFe structure

Параметры	CdS	CdS/ArchFe	CdS:Fe	$\Delta_1, \%$	$\Delta_2, \%$
Sq	297.7 нм	331.1 нм	379.9 нм	11.2	27.6
Sa	231.1 нм	260.6 нм	298.6 нм	12.7	29.2
$\delta, \%$	22.4	21.3	21.4	—	—
a	−0.011	−0.006	−0.094	—	—

материала CdS:Fe относительно немодифицированной поверхности CdS обозначим как Δ_2 .

Анализ значений Δ_1 и Δ_2 дает информацию о том, насколько существенные изменения модификация поверхности внесла в рельеф поверхности. Из таблицы следует, что Sq и Sa для исследуемых поверхностей на первый взгляд различаются значительно ($\delta = 21\text{--}22\%$), но эти различия обусловлены неровностями исходной подложки CdS, нанесение покрытия и отжиг не приводят к увеличению δ , т. е. все изменения происходят равномерно по всей поверхности, что подтверждается при визуальном анализе фрагментов рис. 2.

Анализируя значения Δ_1 и Δ_2 , можно сделать следующий вывод: относительное увеличение шероховатости, вызванное нанесением пленки арахината железа Δ_1 , составило на АСМ-сканах: для Sa 12.7% и для Sq 11.2%, т. е. незначительная разница между Δ_1 и Δ_2 говорит о достаточно хорошей однородности слоя арахината железа по толщине и равномерном его распределении по подложке CdS при нанесении. Но значения Δ_2 приближаются к 30%, т. е. рельеф поверхности существенно поменялся после отжига и это также видно при визуальном сравнении рис. 2, а и рис. 2, в.

2.2. Результаты измерений фотоэлектрических характеристик и их обсуждение

ВАХ монокристаллической подложки CdS в сравнении с ВАХ неотожженной двухслойной структуры CdS/ArchFe, измеренные в темноте и при освещении в режиме поперечной фотопроводимости, были приведены и подробно проанализированы нами в [19]. Было показано, что характер изменения токов при освещении и в темноте не меняется при нанесении покрытия ArchFe, кратность изменения на свету сопротивления гибридной структуры CdS/ArchFe, т. е. её фоточувствительность, остается на прежнем уровне, причем значения и темновых и фототоков

незначительно, но снижаются, что объяснялось наличием на поверхности CdS слоя ArchFe.

В данной статье исследования продолжены и расширены, и на рис. 3 приведены результаты измерений зависимостей тока от напряжения в темноте и при освещении для образцов «чистого» CdS и гетерофазного материала CdS:Fe, полученного при отжиге структуры CdS/ArchFe, также в поперечном режиме фотопроводимости, наиболее полно отражающем изменения, произошедшие после образования включений FeS.

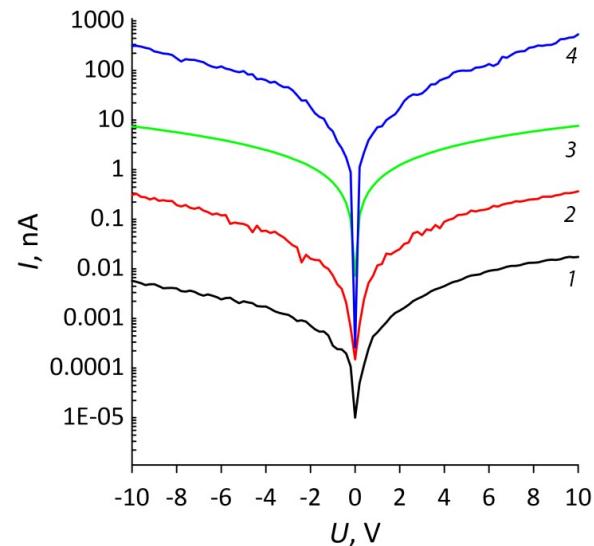


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, построенные в полулогарифмическом масштабе, для образцов «чистого» CdS (кривые 1, 3) и гетерофазного материала CdS:Fe (кривые 2, 4), измеренные в темноте (кривые 1, 2) и при освещении (кривые 3, 4) (цвет онлайн)

Fig. 3. Current-voltage characteristics plotted on a semi-logarithmic scale for samples of «pure» CdS (curves 1, 3) and heterophase material CdS:Fe (curves 2, 4), measured in the dark (curves 1, 2) and under illumination (curves 3, 4) (color online)

Полулогарифмический масштаб рис. 3 позволил отобразить на одном графике ВАХ в темноте и при освещении и визуализировать высокую фоточувствительность исследуемых образцов как до модификации, так и после отжига. При этом

стал менее заметен тот факт, что если ВАХ «чистого» CdS (кривые 1 и 3) стремятся к насыщению (особенно при освещении) и при положительном, и при отрицательном смещении, то для гетерофазного материала CdS:Fe участки насыщения на ВАХ при освещении в рассматриваемом диапазоне напряжений отсутствуют, кроме того, при напряжениях выше 5 В крутизна ВАХ увеличивается настолько, что прирост тока при увеличении напряжения значительно (более чем в 2 раза при значении напряжения ± 10 В) превышает линейную аппроксимацию данной зависимости, т. е. ВАХ становится «сверхлинейной» (кривая 4).

Подобный эффект был ранее замечен на гетерофазных материалах CdS-PbS [24] и объяснялся снижением скорости рекомбинации неравновесных носителей заряда за счет оттока радиационных и технологических дефектов в наноразмерные включения PbS. В данном случае изменение характера ВАХ образца CdS при освещении после легирования его железом можно рассматривать как косвенное подтверждение ранее установленного факта образования нановключений FeS [13]. В результате изменения характера «световой» ВАХ для образца CdS:Fe кратность изменения его сопротивления при освещении (и, соответственно

но, интегральная фоточувствительность, т. е. чувствительность к белому свету) возросла в 70 раз по сравнению с «чистым» CdS – так при напряжении ± 10 В темновые токи равны $1.57 \cdot 10^{-2}$ нА и $3.29 \cdot 10^{-1}$ нА, а токи при освещении возрастают до значений 6.87 нА и 480 нА для CdS и CdS:Fe, соответственно. Таким образом, интегральная фоточувствительность в диапазоне ± 10 В при освещенности 20000 лк для образцов CdS составила $3.42 \cdot 10^{-4}$ нА/лк, а для гетерофазных структур CdS:Fe выросла до значения $2.39 \cdot 10^{-2}$ нА/лк, т. е. почти на 2 порядка.

Помимо анализа ВАХ (стационарный подход) проводилось исследование кинетических характеристик тока при включении освещения интенсивностью 20000 лк на 10 минут с периодическим выключением света на 5 мин при постоянном напряжении –10 В. Полученные зависимости тока от времени представлены на рис. 4 и 5.

Для «чистого» CdS наблюдается типичная для этого материала медленная релаксация токов как после момента включения освещения, так и после его выключения. Выделенные пунктиром участки в моменты включения и выключения освещения были увеличены и приведены на вставках I и II к рис. 4. Их анализ показал, что после

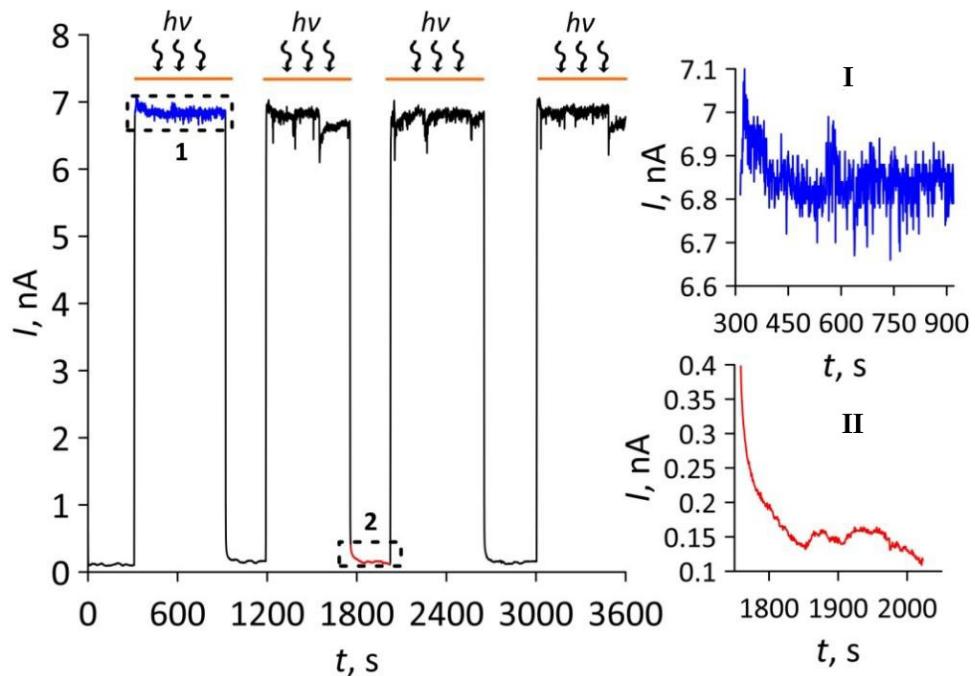


Рис. 4. Зависимость тока от времени для немодифицированного CdS при периодическом включении освещения. Пунктиром выделены, увеличены и показаны на вставках I и II участки включения (фрагмент 1) и выключения (фрагмент 2) освещения (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependence of the current on time for unmodified CdS at a periodic switching on illumination. The areas of switching on (fragment 1) and switching off (fragment 2) illumination are highlighted with the dashed line, enlarged and shown in insets I and II (color online)

выключения света ток уменьшается первые 2 минуты со скоростью около 3 пА/с (выделенная область 2 на рис. 4). Это приводит к значительному размытию фронта импульса тока после выключения освещения и уменьшению темнового тока более чем в 3 раза за 5 мин выдержки образца в темноте. При включении освещения наблюдается небольшая (до 3%) фотоутомляемость (уменьшение тока во времени при фиксированной освещенности [25]), что хорошо видно на выделенной области 1 рис. 4). Это негативно отражается на фоточувствительности материала. При этом от импульса к импульсу значения световых и темновых токов практически не менялись.

Для гетерофазного образца CdS:Fe вид зависимости тока от времени при периодическом включении освещения заметно изменился по сравнению с «чистым» CdS (рис. 5). При включении освещения наблюдается существенная неустойчивость значений тока и, кроме того, фототок как в течение одного импульса, так и от импульса к импульсу имеет тенденцию к росту, а не к уменьшению: за время импульсного освещения (суммарно 40 мин) рост фототока составил почти 60% от первоначального значения.

Подобный эффект, получивший название «отрицательная фотоутомляемость» [24], наблюдался ранее несколькими группами авторов в гетерофазных материалах на основе CdS [24, 25] и объяснялся наличием узкозонных наноразмер-

ных включений [24] и протеканием специфических фотохимических реакций [25]. В темноте наблюдается релаксация тока, но изменения тока менее значительные, чем для «чистого» CdS, что также вписывается в модель гетерофазного фотопроводника с наноразмерными проводящими включениями [24].

Неупорядоченные низкочастотные осцилляции фототока объясняются тем, что, как было показано в пункте 1.1.2, на поверхности осталось незначительное количество Fe, что приложении напряжения к образцу привело к неравномерному распределению поверхностного потенциала. При этом эквивалентную схему, отражающую основные физические процессы в приповерхностном слое CdS:Fe, можно представить как цепочку конденсаторов, шунтированных сопротивлением, резко понижающимся при освещении. Ввиду малой емкости «конденсаторов» и больших сопротивлений утечки при освещении наблюдаются периодические процессы зарядки – разрядки «конденсаторов», приводящие к неустойчивости фототока, наблюдавшейся на рис. 5. Поскольку неуправляемые биения фототока являются нежелательными, необходимо внести изменения в технологический режим (например, можно увеличить время отжига или уменьшить количество наносимых монослоев ArchFe). Увеличивать температуру отжига не целесообразно из-за ускорения процессов окисления Cd и Fe и образования

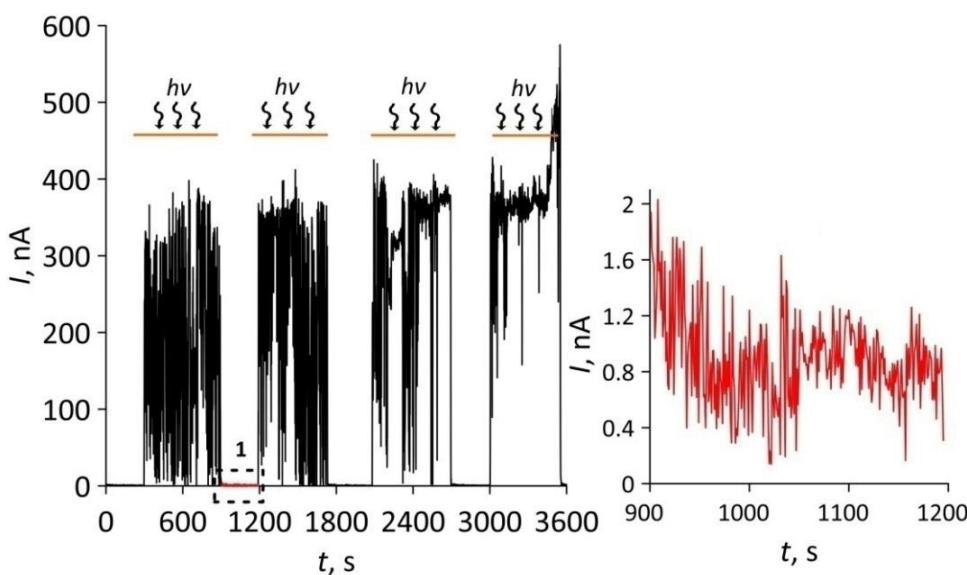


Рис. 5. Зависимость тока от времени для гетерофазного материала CdS:Fe при периодическом включении освещения. Пунктиром выделен, увеличен и показан на вставке участок выключения освещения (цвет онлайн)

Fig. 5. Dependence of the current on time for heterophase material CdS:Fe at a periodic switching on illumination. The area of switching off illumination is highlighted by the dashed line, enlarged and shown in inset (color online)



нефоточувствительных в видимой области спектра оксидов этих металлов.

Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что метод получения материала CdS:Fe, обладающего свойствами ПМП, при использовании технологии Ленгмюра–Блоджетт полностью воспроизводим, позволяет создавать гетерофазный материал с новоключениями фазы FeS. Требуется доработка метода, позволяющая удалять остатки атомов железа с поверхности CdS. Но уже на данном этапе показано, что полученный материал обладает уникальными свойствами, такими как повышенная фоточувствительность и отрицательная фотоутомляемость, что весьма перспективно при создании устройств (например, светоадресуемых биосенсоров), работающих в условиях постоянного интенсивного освещения, характеристики которых могут настраиваться и регулироваться освещением.

Список литературы

1. Роках А. Г. Сублимированные фотопроводящие пленки типа CdS: история и современность // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 53–58. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-2-53-58>
2. Singh V. P., Singh R. S., Sampson K. E. Chapter 6. Thin-Film Solar Cells Based on Nanostructured CdS, CIS, CdTe and Cu₂S // Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion / ed. Tetsuo Soga. Elsevier, 2006. P. 167–190. <https://doi.org/10.1016/B978-044452844-5/50007-X>
3. Hao E., Sun H., Zhou Z., Liu J., Yang B., Shen J. Synthesis and Optical Properties of CdSe and CdSe/CdS Nanoparticles // Chemistry of Materials. 1999. Vol. 11, iss. 11. P. 3096–3102. <https://doi.org/10.1021/cm990153p>
4. Obaid A. S., Mahdi M. A., Hassan Z. Preparation of chemically deposited thin films of CdS/PbS solar cell // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 52, iss. 4. P. 816–823. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2012.06.024>
5. Салманов В. М., Гусейнов А. Г., Джсафаров М. А., Мамедов Р. М., Мамедова Т. А. Особенности фотопроводимости и люминесценции тонких пленок CdS и твердых растворов Cd_{1-x}Zn_xS при лазерном возбуждении // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130, вып. 10. С. 1567–1570. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.10.53627.2983-22>
6. Маскаева Л. Н., Федорова Е. А., Марков В. Ф. Технология тонких пленок и покрытий : учеб. пособие / под ред. Л. Н. Маскаевой. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. 236 с.
7. Смирнов Б. М. Металлические наноструктуры: от кластеров к нанокатализу и сенсорам // Успехи физических наук. 2017. Т. 187, № 12. С. 1329–1364. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038073>
8. Nabok A. V., Richardson T., Davis F., Stirling C. J. M. Cadmium sulfide nanoparticles in Langmuir–Blodgett films of calixarenes // Langmuir. 1997. Vol. 13, iss. 12. P. 3198–3201. <https://doi.org/10.1021/la962115f>
9. Li L., Lou Z., Shen G. Hierarchical CdS Nanowires Based Rigid and Flexible Photodetectors with Ultrahigh Sensitivity // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. Vol. 7, iss. 42. P. 23507–23514. <https://doi.org/10.1021/acsmami.5b06070>
10. Hwang I., Yong K. Novel CdS Hole-Blocking Layer for Photostable Perovskite Solar Cells // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 8, iss. 6. P. 4226–4232. <https://doi.org/10.1021/acsmami.5b12336>
11. Halge D. I., Narwade V. N., Khanzode P. M., Dadge J. W., Banerjee I., Bogle K. A. Enhancement in Visible Light Photoresponse of CdS Thin Films by Nitrocellulose Surface Passivation // ACS Applied Electronic Materials. 2020. Vol. 2, iss. 7. P. 2151–2154. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00361>
12. Hernadez-Borja J., Vorobiev Y. V., Ramirez-Bon R. Thin films solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia – free process // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. Vol. 95, iss. 7. P. 1882–1888. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.012>
13. Стецюра С. В., Харитонова П. Г., Маляр И. В. Полумагнитное пленочное покрытие на основе фоточувствительного полупроводника // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 66–72.
14. Никитин П. И., Савчук А. И. Эффект Фарадея в полумагнитных полупроводниках // Успехи физических наук. 1990. Т. 160, № 11. С. 167–196.
15. Мельничук С. В., Никитин П. И., Савчук А. И., Трифоненко Д. Н. Эффект Фарадея в полумагнитном полупроводнике Cd_{1-x}Fe_xTe // Физика и техника полупроводников. 1996. Т. 30, вып. 10. С. 1831–1837
16. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Magnetic properties of heterophase film coatings based on a solid solution of cadmium sulfide and iron // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, no. 1.2. P. 236–240. <https://doi.org/10.18721/JPM.161.236>
17. Ekrami M., Magna G., Emam-Djomeh Z., Saeed Yarmand M., Paolesse R., Di Natale C. Porphyrin-Functionalized Zinc Oxide Nanostructures for Sensor Applications // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 7. Art. 2279. <https://doi.org/10.3390/s18072279>
18. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G. Langmuir–Blodgett technology to obtain semi-magnetic photosensitive materials // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, iss. 3.3. P. 250–254. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.349>
19. Харитонова П. Г., Глуховской Е. Г., Козловский А. В., Стецюра С. В. Фотоэлектрические характеристики и морфология поверхности сульфида кадмия, модифицированного арахинатом железа // Физика



- и техника полупроводников. 2023. Т. 57, № 7. С. 518–521. <https://doi.org/10.61011/FTP.2023.07.56780.4912C>
20. Kanicky J. R., Shah D. O. Effect of degree, type, and position of unsaturation on the pKa of long-chain fatty acids // Journal of Colloid and Interface Science. 2002. Vol. 256, iss. 1. P. 201–207. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8009>
21. Hwan Ha T., Kyu Kim D., Choi M. U., Kim K. Influence of Poly(ethylenimine) on the Monolayer of Oleic Acid at the Air/Water Interface // Journal of Colloid and Interface Science. 2000. Vol. 226, iss. 1. P. 98–104. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6819>
22. Khomutov G. B., Bykov I. V., Gainutdinov R. V., Polyakov S. N., Sergeyev-Cherenkov A. N., Tolstikhina A. L. Synthesis of Ni-containing nanoparticles in Langmuir–Blodgett films // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002. Vol. 198–200. P. 559–567. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00961-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00961-X)
23. Харитонова П. Г., Сердобинцев А. А., Стецюра С. В. Применение масс-спектрометрических исследований для оптимизации модели биосенсорной структуры с гетерофазным преобразователем сигнала // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2023 : сб. статей Всероссийской школы-семинара / под ред. проф. Ан. В. Скрипаля. Саратов : Изд-во «Саратовский источник», 2023. С. 126–129.
24. Роках А. Г., Стецюра С. В., Сердобинцев А. А. Гетерофазные полупроводники под действием излучений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2005. Т. 5, вып. 1. С. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-92-102>
25. Шейнкман М. К., Корсунская Н. Е. Фотохимические реакции в полупроводниках типа A2B6 // Физика соединений A2B6 / под ред. А. Н. Георгиевичи, М. К. Шейнкмана. М. : Наука, 1986. С. 109–145.
5. Salmanov V. M., Guseinov A. G., Jafarov M. A. Mamedov R. M., Mamedova T. A. Features of photoconductivity and luminescence of CdS thin films and Cd_{1-x}Zn_xS solid solutions under laser excitation. *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, iss. 10, pp. 1308–1311. <https://doi.org/10.21883/eos.2022.10.54868.2983-22>
6. Maskaeva L. N., Fedorova E. A., Markov V. F. *Tekhnologija tonkikh plenok i pokrytij: ucheb. posobie* [Maskaeva L. N., ed. Technology of thin films and coatings: A study guide]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2019. 236 p. (in Russian).
7. Smirnov B. M. Metal nanostructures: From clusters to nanocatalysis and sensors. *Physics-Uspekhi*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 1236–1267 (in Russian). <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.02.038073>
8. Nabok A. V., Richardson T., Davis F., Stirling C. J. M. Cadmium sulfide nanoparticles in Langmuir–Blodgett films of calixarenes. *Langmuir*, 1997, vol. 13, iss. 12, pp. 3198–3201. <https://doi.org/10.1021/la962115f>
9. Li L., Lou Z., Shen G. Hierarchical CdS Nanowires Based Rigid and Flexible Photodetectors with Ultrahigh Sensitivity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, iss. 42, pp. 23507–23514. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06070>
10. Hwang I., Yong K. Novel CdS Hole-Blocking Layer for Photostable Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, vol. 8, iss. 6, pp. 4226–4232. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b12336>
11. Halge D. I., Narwade V. N., Khanzode P. M., Dadge J. W., Banerjee I., Bogle K. A. Enhancement in Visible Light Photoresponse of CdS Thin Films by Nitrocellulose Surface Passivation. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, vol. 2, iss. 7, pp. 2151–2154. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00361>
12. Hernadez-Borja J., Vorobiev Y. V., Ramirez-Bon R. Thin films solar cells of CdS/PbS chemically deposited by an ammonia – free process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95, iss. 7, pp. 1882–1888. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.012>
13. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Malyar I. V. Semimagnetic film coating based on a photosensitive semiconductor. *Applied Physics*, 2020, no. 5, pp. 66–72.
14. Nikitin P. I., Savchuk A. I. The Faraday effect in semimagnetic semiconductors. *Soviet Physics Uspekhi*, 1990, vol. 33, no. 1, pp. 974–989 (in Russian). <https://doi.org/10.1070/PU1990v03n11ABEH002659>
15. Mel'nicuk S. V., Nikitin P. I., Savchuk A. I., Trifonenko D. N. Faraday effect in semimagnetic Cd_{1-x}Fe_xTe semiconductor. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 1, pp. 959–961.
16. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Magnetic properties of heterophase film coatings based on a solid solution of cadmium sulfide and iron. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16, no. 1.2, pp. 236–240. <https://doi.org/10.18721/JPM.161.236>
17. Ekrami M., Magna G., Emam-Djomeh Z., Saeed Yarmand M., Paolesse R., Di Natale C. Porphyrin-Functionalized Zinc Oxide Nanostructures for Sensor Ap-

References

1. Rokakh A. G. Sublimated Photoconductive Films of CdS Type: History and Modernity. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 53–58 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2015-15-2-53-58>
2. Singh V. P., Singh R. S., Sampson K. E. Chapter 6. Thin-Film Solar Cells Based on Nanostructured CdS, CIS, CdTe and Cu₂S. In: Tetsuo Soga, ed. *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*. Elsevier, 2006, pp. 167–190. <https://doi.org/10.1016/B978-044452844-5/50007-X>
3. Hao E., Sun H., Zhou Z., Liu J., Yang B., Shen J. Synthesis and Optical Properties of CdSe and CdSe/CdS Nanoparticles. *Chemistry of Materials*, 1999, vol. 11, iss. 11, pp. 3096–3102. <https://doi.org/10.1021/cm990153p>
4. Obaid A. S., Mahdi M. A., Hassan Z. Preparation of chemically deposited thin films of CdS/PbS solar cell. *Superlattices and Microstructures*, 2012, vol. 52, iss. 4, pp. 816–823. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2012.06.024>

- plications. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 7, art. 2279. <https://doi.org/10.3390/s18072279>
18. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G. Langmuir–Blodgett technology to obtain semi-magnetic photosensitive materials. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, iss. 3.3, pp. 250–254. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.349>
19. Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G., Kozlowski A. V., Stetsyura S. V. Photoelectric characteristics and surface morphology of cadmium sulfide modified by iron arachinate. *Semiconductors*, 2023, vol. 57, iss. 7, pp. 510–513. <https://doi.org/10.61011/SC.2023.07.57411.4912C>
20. Kanicky J. R., Shah D. O. Effect of degree, type, and position of unsaturation on the pKa of long-chain fatty acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, vol. 256, iss. 1, pp. 201–207. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8009>
21. Hwan Ha T., Kyu Kim D, Choi M. U., Kim K. Influence of Poly(ethylenimine) on the Monolayer of Oleic Acid at the Air/Water Interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, vol. 226, iss. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6819>
22. Khomutov G. B., Bykov I. V., Gainutdinov R. V., Polyakov S. N., Sergeyev-Cherenkov A. N., Tolstikhina A. L. Synthesis of Ni-containing nanoparticles in Langmuir–Blodgett films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, vol. 198–200, pp. 559–567. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00961-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00961-X)
23. Kharitonova P. G., Serdobintsev A. A., Stetsyura S. V. Application of mass spectrometric studies to optimize a model of a biosensor structure with a heterophase signal transducer. *Metody komp'iuternoi diagnostiki v biologii i meditsine – 2023: Sbornik statei Vserossiiskoi shkoly-seminara*. Pod red. An. V. Skripal'ia [Skripal An. V., ed. Methods of Computer Diagnostics in Biology and Medicine – 2023: Collection of articles of the All-Russian school-seminar]. Saratov, Izdatelstvo “Saratovskii istochnik”, 2023, pp. 126–129 (in Russian).
24. Rokakh A. G., Stetsyura S. V., Serdobintsev A. A. Heterophase semiconductors under action of irradiations. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2005, vol. 5, iss. 1, pp. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-92-102> (in Russian).
25. Sheinkman M. K., Korsunskaya N. E. Photochemical reactions in semiconductors of A2B6 type. In: *Fizika soedinenii A2B6* [Georgobiani A. N., Sheinkman M. K., eds. Physics of Compounds A2B6]. Moscow, Nauka, 1986. pp. 109–145 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.06.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024;
принята к публикации 02.09.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 19.06.2024; approved after reviewing 05.08.2024;
accepted for publication 02.09.2024; published 31.03.2025