

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 539.87

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-43-54>

EDN AYEFUG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Создание двумерных полупроводников на поверхности сегнетоэлектрических пленок методом механической эксфолиации при помощи золота

Е.И. Жемеров[®], А.А. Гуськов, Е.А. Булавинцева, Д.С. Серегин, С.Д. Лавров

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: zhemerov@mirea.ru

• Поступила: 02.06.2025 • Доработана: 10.07.2025 • Принята к опубликованию: 07.11.2025

Резюме

Цели. Цель работы заключается в разработке и демонстрации эффективного метода получения протяженных и высококачественных монослоев дисульфида молибдена (MoS_2) на поверхности сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС) с выраженной зернистой и текстурированной структурой. Стандартные методы механической эксфолиации оказываются неэффективными для переноса двумерных материалов на неровные поверхности из-за локальных перепадов высоты и зернистости подложки, что приводит к невозможности формирования протяженных монослоев и высокой плотности дефектов в переносимых структурах. Особую сложность представляет перенос на функциональные подложки с рельефом поверхности, характеризующимся неоднородностью на масштабах от десятков нанометров до микрометров.

Методы. Использован метод золото-ассистированной эксфолиации (gold-assisted exfoliation, GAE), включающий магнетронное напыление золотой пленки толщиной 50 нм, механическое отделение монослоев с помощью терморасщепляемого скотча и последующее травление золота. Характеризация проведена методами рентгеновской дифракции, оптической конфокальной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и генерации второй оптической гармоники. Сравнение эффективности переноса выполнено на подложках кремния/оксида кремния (Si/SiO_2) и ЦТС.

Результаты. Получены кристаллиты MoS_2 площадью до 3000 μm^2 на ЦТС и свыше 65000 μm^2 – на стандартных подложках Si/SiO_2 при минимальной плотности дефектов. Показано, что стандартная механическая эксфолиация не обеспечивает перенос на текстурированные поверхности, тогда как GAE сохраняет монослойность переносимых кристаллитов даже на неровных подложках.

Выводы. Впервые продемонстрирована возможность получения протяженных и высококачественных монослоев MoS_2 на подложках с выраженной зернистой и текстурированной структурой, таких как сегнетоэлектрические пленки ЦТС, с помощью метода золото-ассистированной эксфолиации. Показано, что золото-ассистированная эксфолиация представляет собой эффективный метод для создания протяженных двумерных пленок с контролируемыми морфологическими и структурными характеристиками, в т.ч. на подложках, ранее считавшихся непригодными для подобных задач.

Ключевые слова: двумерные материалы, дисульфид молибдена, золото-ассистированная эксфолиация, сегнетоэлектрические пленки, цирконат-титанат свинца, механическая эксфолиация, наноструктуры, FeFET

Для цитирования: Жемеров Е.И., Гуськов А.А., Булавинцева Е.А., Серегин Д.С., Лавров С.Д. Создание двумерных полупроводников на поверхности сегнетоэлектрических пленок методом механической эксфолиации при помощи золота. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):43–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-43-54>, <https://www.elibrary.ru/AYEFUG>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Fabrication of two-dimensional semiconductors on the surface of ferroelectric films by means of gold-assisted mechanical exfoliation

Evgeny I. Zhemerov[®], Andrey A. Guskov, Elizaveta A. Bulavintseva,
Dmitry S. Seregin, Sergei D. Lavrov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: zhemerov@mirea.ru

• Submitted: 02.06.2025 • Revised: 10.07.2025 • Accepted: 07.11.2025

Abstract

Objectives. The aim of this study is to develop and demonstrate an effective method for obtaining large-area, high-quality monolayers of molybdenum disulfide (MoS_2) on the surface of ferroelectric lead zirconate titanate (PZT) films which exhibit pronounced granularity and texturing. Conventional mechanical exfoliation techniques are inefficient for transferring two-dimensional materials onto nonplanar surfaces. This is due to local height variations and substrate granularity which hinder the formation of continuous monolayers and high-defect-density transferred structures. A particular challenge is the transfer onto functional substrates with surface topography characterized by heterogeneities ranging from tens of nanometers to micrometers.

Methods. A gold-assisted exfoliation (GAE) method was employed, including: magnetron sputtering of a 50 nm gold film; mechanical delamination of monolayers using thermally cleavable tape; and subsequent gold etching. The characterization was performed using X-ray diffraction, optical confocal microscopy, atomic force microscopy, and second harmonic generation techniques. The efficiency of the transfer process was compared for Si/SiO_2 and PZT substrates.

Results. MoS_2 crystallites with areas up to $3000 \mu\text{m}^2$ were obtained on PZT and over $65000 \mu\text{m}^2$ on standard Si/SiO_2 substrates, both of which exhibit minimal defect densities. Conventional mechanical exfoliation is shown to be unable to ensure transfer onto textured surfaces, whereas the GAE method preserves the monolayer character of the transferred crystallites even on nonplanar substrates.

Conclusions. This work demonstrates for the first time the possibility of obtaining large-area, high-quality MoS_2 monolayers on substrates with pronounced grainy and textured structures, such as ferroelectric PZT films, using the gold-assisted exfoliation method. The work also shows that gold-assisted exfoliation is an effective technique for fabricating extended two-dimensional films with controlled morphological and structural properties, including on substrates previously considered unsuitable for such applications.

Keywords: two-dimensional materials, molybdenum disulfide, gold-assisted exfoliation, ferroelectric thin films, lead zirconate titanate, mechanical exfoliation, nanostructures, FeFET

For citation: Zhemerov E.I., Guskov A.A., Bulavintseva E.A., Seregin D.S., Lavrov S.D. Fabrication of two-dimensional semiconductors on the surface of ferroelectric films by means of gold-assisted mechanical exfoliation. *Russian Technological Journal*. 2026;14(1):43–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-1-43-54>, <https://www.elibrary.ru/AYEFUG>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия двумерные (2D) материалы, такие как графен, дисульфид молибдена и гексагональный нитрид бора, стали объектом интенсивных исследований благодаря своим уникальным физическим, оптическим и электронным свойствам, которые принципиально отличаются от характеристик объемных аналогов [1, 2]. Эти особенности обусловлены квантовым размерным эффектом, высокой анизотропией, увеличенной удельной поверхностью и изменением электронной структуры при переходе к атомарно тонким слоям. В частности, двумерные материалы демонстрируют необычные квантовые явления, такие как квантовый эффект Холла, сильная флуоресценция в монослоях MoS_2 и сверхвысокая подвижность носителей заряда, что открывает новые горизонты для фундаментальных исследований в области физики конденсированного состояния и материаловедения [3].

Благодаря этим свойствам двумерные материалы рассматриваются в качестве платформы для создания новых поколений электронных, оптоэлектронных, энергетических и сенсорных устройств. Однако практическая реализация этих перспектив тесно связана с возможностью получения высококачественных, бездефектных и протяженных по площади монослоев, а также с их интеграцией в современные микро- и нанoeлектронные технологии. До недавнего времени синтез таких слоев и их перенос на функциональные подложки оставались серьезной технологической проблемой, что существенно сдерживало как углубленные исследования фундаментальных закономерностей, так и разработку прикладных решений.

Существует несколько методов получения двумерных материалов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Наиболее распространенные подходы включают механическую эксфолиацию, жидкостную эксфолиацию и химическое осаждение из газовой фазы (chemical vapor deposition, CVD). Механическая эксфолиация, впервые примененная для синтеза графена, остается эталонным методом для получения высококачественных образцов с низкой плотностью дефектов [4], но ее масштабируемость

ограничена малыми латеральными размерами. Жидкостная эксфолиация позволяет производить материалы массово, но приводит к фрагментации кристаллов и загрязнению. Химическое осаждение из газовой фазы обеспечивает синтез пленок большой площади, однако плотность дефектов в таких материалах часто превышает 10^{12} – 10^{13} см^{-2} [5].

Одним из возможных путей решения проблемы создания слоев с нужными характеристиками является относительно недавно разработанный метод эксфолиации с использованием золота (gold assisted exfoliation, GAE). Он сочетает преимущества механической эксфолиации и масштабируемости, позволяя получать монокристаллы размером до сантиметра [6–8], при этом плотность дефектов в получаемых слоях минимальна и может достигать $\sim 3 \cdot 10^{11}$ см^{-2} [9]. Это делает GAE предпочтительным методом для задач, где критичны высокое структурное совершенство и чистота поверхности.

Несмотря на значительный прогресс в области получения двумерных материалов, интеграция высококачественных 2D-кристаллов в реальные устройства по-прежнему сопряжена с серьезными технологическими вызовами. Одной из ключевых задач современной электроники является создание функциональных структур, в которых двумерные слои должны быть перенесены на подложки с выраженной поверхностной топографией, например, сегнетоэлектрические пленки ЦТС (цирконат-титанат свинца), используемые в архитектуре сегнетоэлектрических полевых транзисторов (ferroelectric field-effect transistor, FeFET) и других мемристорных устройствах. Однако стандартные методы механической эксфолиации оказываются неэффективными для переноса 2D-материалов на такие неровные или текстурированные поверхности: из-за локальных перепадов высоты и зернистости подложки площадь контакта между двумерным кристаллом и подложкой резко уменьшается, что приводит к невозможности формирования протяженных и непрерывных монослоев. В результате, попытки использования классических подходов приводят либо к полному отсутствию переноса, либо к образованию сильно фрагментированных и дефектных областей, непригодных для практического применения.

Для преодоления этих ограничений требуется разработка новых методов, способных обеспечить селективный и деликатный перенос двумерных материалов даже на сложные подложки с выраженной микронеровностью. Одним из наиболее перспективных решений является метод GAE, упомянутый выше. Однако применение этого метода для переноса на текстурированные сегнетоэлектрические пленки до настоящего времени практически не исследовано. Учитывая, что именно такие структуры необходимы для реализации современных FeFET- и мемристорных устройств, задача демонстрации возможности эффективного переноса 2D-материалов на ЦТС и аналогичные поверхности приобретает фундаментальное и прикладное значение.

Основная цель настоящей работы – экспериментально показать, что метод золото-ассистированной эксфолиации обеспечивает формирование протяженных и высококачественных монослоев 2D-материалов не только на стандартных плоских подложках, но и на функциональных сегнетоэлектрических пленках с выраженной топографией. В рамках исследования проводится сравнение эффективности переноса на SiO_2 и на ЦТС, а также анализируются морфология, структурное совершенство и площадь полученных кристаллитов. Особое внимание уделяется сравнению с результатами, полученными при использовании классической механической эксфолиации, которая, как показано в работе, не обеспечивает перенос 2D-материалов на неровные подложки. Таким образом, результаты работы не только расширяют фундаментальное понимание механизмов взаимодействия двумерных кристаллов с текстурированными поверхностями, но и открывают новые возможности для интеграции 2D-материалов в перспективные устройства электроники и спинтроники.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Методика создания двумерных пленок

В качестве двумерного полупроводникового материала для создания монослоев был выбран дисульфид молибдена (MoS_2), что обусловлено двумя ключевыми факторами: его широким применением в современных исследованиях и сильным химическим взаимодействием с золотом [10]. Атомы золота, обладающие вакантными d -орбиталями, эффективно взаимодействуют с неподеленными электронными парами атомов серы, образуя прочные ковалентные связи. Данное взаимодействие обеспечивает высокую селективность метода GAE по отношению к серосодержащим соединениям, что делает MoS_2 оптимальным материалом для отработки данной методики.

Для верификации разработанного метода эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе в качестве подложки для формирования референсных квазидвумерных кристаллитов использовалась стандартная структура кремния / оксида кремния (Si/SiO_2), традиционно применяемая при механической эксфолиации [11, 12]. На втором этапе технология золото-ассистированной эксфолиации была адаптирована для нанесения на текстурированную сегнетоэлектрическую пленку ЦТС, что позволило оценить применимость метода для создания двумерных структур на функциональных материалах с неоднородной поверхностью.

Пленки ЦТС ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})\text{O}_3$) формировались из пленкообразующего раствора, приготовленного золь-гель методом с использованием комплекса моносольвата изопропилата циркония ($\text{Zr}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4 \cdot (\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$, Sigma-Aldrich, США), тетраизопропоксида титана ($\text{Ti}[\text{O}(\text{CH}_3)_2\text{CH}]_4$, Sigma-Aldrich) и ацетата свинца ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), синтезированного из оксида свинца (PbO , Sigma-Aldrich) согласно разработанной ранее методике [13]. Нанесение раствора ЦТС выполнялось послойно (6 слоев, ~ 220 нм) методом центрифугирования на платинированные кремниевые подложки со структурой: Pt (~ 150 нм)– TiO_2 (~ 10 нм)– SiO_2 (~ 300 нм)–Si (~ 800 мкм). После центрифугирования (2500 об/мин) каждый слой сушили 5 мин инфракрасной лампой в импульсном режиме при температуре $\sim 200^\circ\text{C}$ и отжигали 15 мин при температуре 400°C в муфельной печи СНОЛ 1,6,2,5.1/10-ИЗМ (Термикс, Россия). После термообработки шестого слоя образец кристаллизовали 10 мин с помощью установки быстрого отжига AS-One 150 (Annealsys, Франция) при температуре 650°C (скорость нагрева $\sim 15^\circ\text{C}/\text{c}$).

Процесс создания монокристаллических образцов включает пять ключевых этапов, которые подробно представлены на рис. 1. На первом этапе объемный кристалл дисульфида молибдена подвергается послойному разделению с помощью клейкой ленты (например, силиконового скотча). Этот этап позволяет получить многослойные фрагменты толщиной от нескольких нанометров до микронных масштабов. На втором этапе на предварительно подготовленные многослойные кристаллиты MoS_2 с помощью магнетронной установки на базе ВУП¹-5 (Россия) наносится золотая пленка толщиной 50 нм. Процесс проводится в вакуумной камере при мощности 100 Вт и давлении аргона $5 \cdot 10^{-3}$ Торр. Третий этап состоит в том, что терморасщепляемый скотч (thermal release tape, TRT) плотно прижимается к золотой поверхности. После фиксации скотч аккуратно отделяется от исходной подложки,

¹ Вакуумный универсальный пост.

захватывая верхний слой MoS_2 вместе с золотой пленкой. Сила сцепления Au-MoS_2 превышает межслойные ван-дер-ваальсовы связи в MoS_2 , обеспечивая селективное отделение монослоя. На четвертом этапе полученная структура TRT– Au-MoS_2 переносится на подложку Si/SiO_2 таким образом, чтобы слой MoS_2 оказался в контакте с подложкой, после чего она нагревается на горячей плите при температуре $130\text{--}150^\circ\text{C}$ в течение 1–2 мин. Это ослабляет адгезию TRT-скотча, позволяя его бесследно удалить. На заключительном этапе золотая пленка удаляется путем погружения в травильный раствор ($4\text{ г KI} + 1\text{ г I}_2$ в $40\text{ мл H}_2\text{O}$) на 3–5 мин при комнатной температуре. MoS_2 демонстрирует химическую инертность к этому реагенту благодаря ковалентной S–Mo–S-структуре. После завершения травления поверхность подвергается 10-минутной очистке с использованием ацетона для удаления остатков травильного раствора, после чего осуществляется промывка изопропиловым спиртом. Такая процедура обеспечивает полное устранение загрязнений и остатков реактивов, что способствует формированию чистых и высококачественных монослоев двумерных полупроводников с большими латеральными размерами.

1.2. Методики исследования

Для анализа кристаллической структуры использовался метод рентгеновской дифракции, который позволяет определить межплоскостные расстояния и симметрию структуры. Это необходимо для проверки фазовой чистоты объемного дисульфида молибдена и оценки качества пленок ЦТС, которые служили основой для создания двумерных пленок.

Такой подход позволяет подтвердить соответствие материалов заданным характеристикам и их пригодность для дальнейших исследований.

Дифрактограммы были получены с использованием дифрактометра ДРОН-8Т (Буревестник, Россия) при напряжении 40 кВ и токе 20 мА . Ввиду ограничений метода исследованию подвергались только объемные образцы MoS_2 и поликристаллические пленки ЦТС, поскольку малая толщина двумерных пленок существенно затрудняет выделение дифракционного сигнала на фоне подложки.

После проведения эксфолиации методом GAE для поиска монослойных кристаллитов MoS_2 на поверхности подложки применялась стандартная методика оптической конфокальной микроскопии. Этот подход оптимален для быстрого предварительного анализа: он позволяет определить толщину, размеры и наличие дефектов в кристаллитах [8]. Для этого был использован оптический микроскоп Alpha 300s+ (WITec, Германия) с высокоапертурными объективами и цветными фильтрами, которые обеспечивают повышение контрастности изображения монослойных кристаллитов, что критически важно при работе с атомарно тонкими материалами. Такой метод позволяет эффективно выделять перспективные области для последующего детального изучения другими аналитическими методами.

Для точной оценки топографии двумерных материалов использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ), которая дополняет данные оптических исследований. Атомно-силовая микроскопия обеспечивает получение трехмерного изображения поверхности с разрешением до нанометров, что позволяет выявлять дефекты, такие как трещины, дислокации и шероховатость. Это особенно важно для контроля

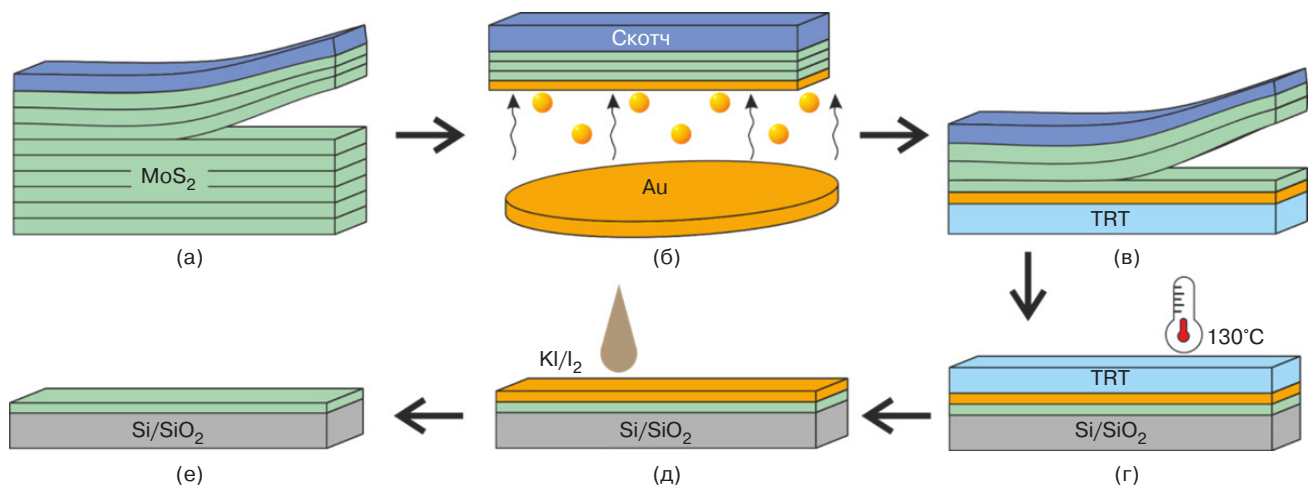


Рис. 1. Процесс создания монослойных пленок MoS_2 : (а) механическая эксфолиация MoS_2 , (б) магнетронное напыление золота на MoS_2 , (в) нанесение TRT-скотча на золото и последующее отслоение MoS_2 , (г) удаление TRT-скотча нагревом, (д) травление золота раствором KI/I_2 , (е) готовый монослой на подложке Si/SiO_2

качества полученных двумерных пленок и оценки влияния подложки на их морфологию [14]. Все измерения были проведены с помощью установки сканирующей зондовой микроскопии Ntegra Prima (НТ-МДТ, Россия) в контактном режиме. Использовались жесткие зонды серии Etalon с коэффициентом жесткости 12 Н/м, что обеспечило оптимальный баланс между разрешающей способностью и сохранностью исследуемых образцов.

Стандартная методика люминесцентной микроскопии-спектроскопии не применялась в данном исследовании из-за полного тушения сигнала, вызванного остаточными наноструктурами золота после применения методики GAE. Даже совсем незначительное количество золота (Au), сохраняющееся на поверхности подложки или вблизи двумерных кристаллитов, действует как эффективные центры безызлучательной рекомбинации. Это связано с двумя основными механизмами тушения люминесценции. Первый механизм – эффект зарядового тушения – перенос электронов из MoS_2 в Au приводит к *p*-допированию материала и подавлению экситонной люминесценции. Второй механизм – резонансный перенос энергии – при расстояниях менее 10 нм между Au и MoS_2 происходит безызлучательный перенос энергии от экситонов к плазмонным модам золота [15, 16]. Кроме того, данная методика не применима к образцам толще одного монослоя [17].

Именно поэтому для изучения структурной симметрии, кристаллографической ориентации и дефектов в двумерных материалах дополнительно применялся метод генерации второй оптической гармоники (ГВГ). Этот нелинейно-оптический метод основан на преобразовании двух фотонов возбуждающего излучения в один фотон с удвоенной частотой в нецентросимметричных средах. Метод генерации второй оптической гармоники особенно эффективен для исследования тонких слоев MoS_2 , поскольку интенсивность сигнала существенно зависит от количества слоев и их политапа. В областях с нарушенной кристаллической симметрией, включая края, дефекты и переходы между доменами, наблюдается значительное усиление нелинейного отклика, что обеспечивает высокую чувствительность метода к структурным особенностям двумерных кристаллитов.

В используемой экспериментальной установке источником излучения служил фемтосекундный титан-сапфировый лазер TiF-DR 60 (Авеста, Россия) с длительностью импульсов 20–60 фс и частотой следования 80 МГц. Фемтосекундные импульсы обеспечивали высокую пиковую мощность при низкой средней, что позволяло получать интенсивный нелинейный отклик без термического повреждения образца. Для прецизионного позиционирования и сканирования образца также был использован модифицированный конфокальный микроскоп WITec Alpha 300S+.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для характеристики кристаллической структуры и фазового состава исходных материалов проведены рентгенодифракционные исследования в режиме 2θ -сканирования, результаты которых представлены на рис. 2. Дифрактограмма объемного кристалла MoS_2 демонстрирует четко выраженные рефлексы (004), (006) и (008), что свидетельствует о высокой степени кристалличности и преимущественной ориентации кристаллитов вдоль оси, перпендикулярной плоскости слоев. Такой характер дифракционной картины указывает на гексагональную структуру 2H или 3R политапа MoS_2 , что полностью соответствует литературным данным [18, 19]. Анализ дифрактограммы пленки ЦТС выявил присутствие характеристических пиков (100), (111), (002), (200) и (301), подтверждающих формирование перовскитной фазы с преимущественной ориентацией в плоскости (111) [20]. Формирование перовскитоподобной структуры ABO_3 в ЦТС обеспечивает возникновение сегнетоэлектрических свойств за счет смещения катионов $\text{Ti}^{4+}/\text{Zr}^{4+}$ и Pb^{2+} из центросимметричных позиций в кислородных октаэдрах, что нарушает инверсионную симметрию кристалла и создает спонтанную поляризацию [21]. Возможность переориентации этой поляризации внешним электрическим полем определяет сегнетоэлектрическое поведение материала, что подтверждается характерными петлями гистерезиса на зависимостях поляризация-электрическое поле [22]. Наблюдаемые малоинтенсивные рефлексы, соответствующие фазам Pt и Si, связаны с многослойной структурой используемой подложки и не влияют на функциональные свойства сегнетоэлектрической пленки. Количественный анализ полуширины дифракционных линий указывает на отсутствие значимых микронапряжений и структурных дефектов в исследуемых материалах, что подтверждает их высокое кристаллическое совершенство и структурную однородность. Данные результаты свидетельствуют о пригодности выбранных материалов для дальнейшего применения в качестве исходного сырья и функциональной подложки при создании гетероструктур методом золото-ассистированной эксфолиации.

Для анализа влияния параметров поверхности используемых подложек на эффективность применения методики GAE поверхности обеих подложек – Si/SiO₂ и ЦТС были проанализированы с помощью методики АСМ. Полученные трехмерные карты поверхностей подложек представлены на рис. 3. Как явно прослеживается из полученных результатов, ЦТС обладает значительно большими неоднородностями на поверхности из-за особенностей роста зерен в процессе кристаллизации. Для пленок ЦТС,

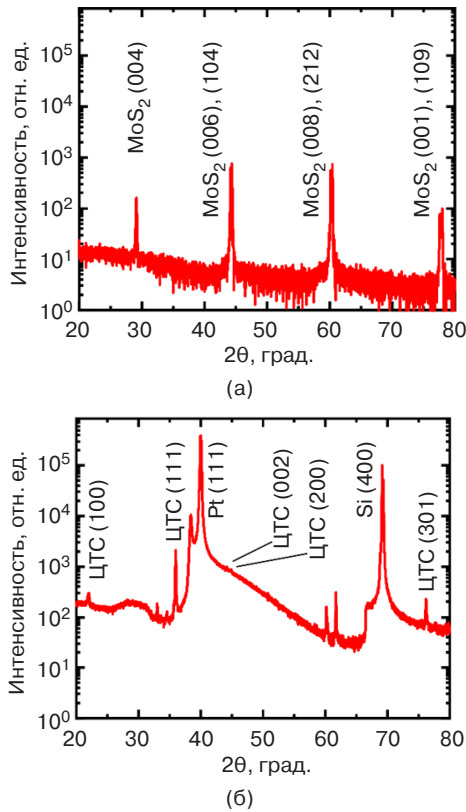


Рис. 2. Дифрактограммы объемных кристаллов MoS₂ (а) и подложки ЦТС (б)

полученных методом золь-гель, характерно формирование поликристаллической структуры с выраженными границами зерен, что приводит к образованию текстурированной поверхности. При дальнейшем анализе полученных результатов было установлено, что ЦТС обладает шероховатостью порядка $1.090 \cdot 10^{-9}$ м, тогда как у подложки Si/SiO₂ этот параметр равен $5.073 \cdot 10^{-10}$ м.

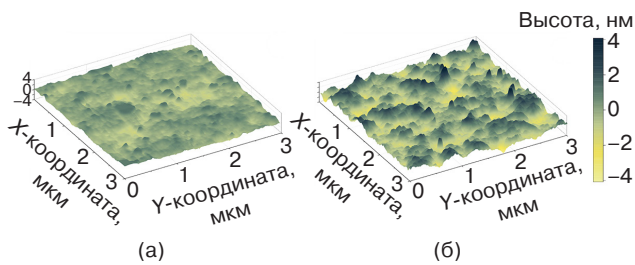


Рис. 3. Трехмерные карты топографии поверхности подложек, полученные методом АСМ: (а) Si/SiO₂ и (б) поликристаллическая пленка ЦТС

Таким образом, перепады высоты на поверхности подложки ЦТС сопоставимы или даже превышают толщину наносимых на нее двумерных пленок MoS₂ (~0.7 нм для монослоя), что приводит к существенному уменьшению площади контакта между подложкой и пленкой. Неоднородный контакт материалов негативным образом влияет на силы

Ван-дер-Ваальса, отвечающие за адгезию MoS₂ к поверхности, что в свою очередь ухудшает качество осаждения двумерных кристаллитов и приводит к образованию дефектов на границах контакта между двумерным материалом и подложкой. Все это снижает эффективность переноса заряда и ухудшает электронные характеристики устройств.

После создания образцов далее методом конфокальной оптической микроскопии на поверхностях подложек Si/SiO₂ и ЦТС было идентифицировано несколько сотен двумерных кристаллитов MoS₂. Для детального анализа были отобраны характерные образцы с типичными морфологическими характеристиками: площадь ~200 мкм², отсутствие видимых дефектов и равномерное распределение по поверхности. На рис. 4а и 4г представлены кристаллиты для каждой подложки, выбранные как эталоны для сравнительного исследования.

Для определения толщины и латеральных размеров кристаллитов методом АСМ были получены топографические карты (рис. 4б и 4д). Толщина пленки на подложке Si/SiO₂ составила 5 нм, что соответствует ~8 монослоям MoS₂ при межслойном расстоянии 0.65 нм, тогда как на ЦТС зафиксирована толщина 8 нм (~12 слоев). Площадь кристаллитов составляла примерно 200 мкм² для обоих кристаллитов.

Средняя шероховатость поверхности пленок MoS₂ составила 2.53 нм для обеих подложек, что значительно превышает значения для исходных подложек (0.51 нм для Si/SiO₂ и 1.09 нм для ЦТС). Такой рост шероховатости обусловлен появлением выраженных морфологических неровностей, прежде всего складок, которые отчетливо видны на топографических картах и выделены красным цветом на рис. 4в и 4е. Формирование складок связано с особенностями механического переноса и спецификой применения методики GAE. Кроме того, на поверхности кристаллитов наблюдаются сторонние дефекты, вызванные остаточными материалами после травления золота; эти дефекты проявляются как локальные включения и могут быть обнаружены как на подложке, так и по всей площади монослоя. Важно отметить, что зернистая структура подложки ЦТС частично просматривается сквозь поверхность MoS₂, что указывает на неоднородный контакт между пленкой и подложкой и наличие областей, где MoS₂ оказывается «подвешенным» над поверхностью.

На рис. 5а представлено изображение, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), кристаллита MoS₂ на подложке Si/SiO₂, где четко видны характерные складки пленки (отмечены стрелками), образовавшиеся в процессе механического переноса. Анализ топографии выявил, что высота складок достигает 30 нм при средней длине 5 мкм, что согласуется с данными АСМ-исследований (рис. 4б, 4д).

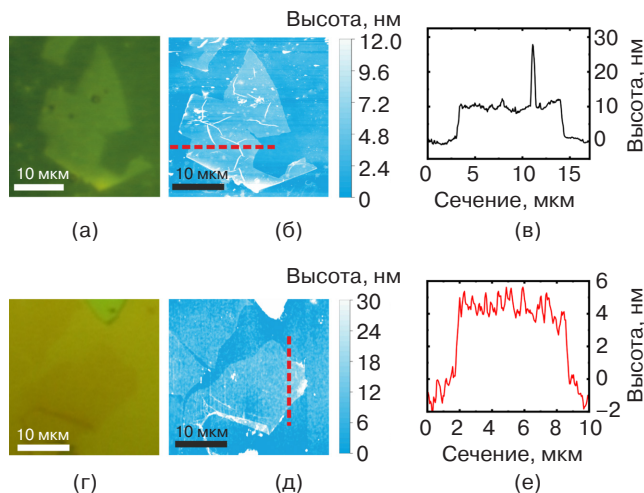


Рис. 4. Результаты эксфолиации с использованием золота:

(а) оптическое изображение области с кристаллитами MoS_2 на подложке Si/SiO_2 ; (б) АСМ-топография кристаллита MoS_2 на подложке Si/SiO_2 ; (в) профиль высоты, полученный по сечению (красная пунктирная линия), показанному на (б); (г) оптическое изображение области с кристаллитами MoS_2 на подложке ЦТС; (д) АСМ-топография кристаллита MoS_2 на подложке ЦТС; (е) профиль высоты, полученный по сечению (красная пунктирная линия), показанному на (д)

Для подложки ЦТС аналогичные СЭМ-измерения не проводились из-за возникновения локальной переполаризации сегнетоэлектрической пленки под действием электронного пучка, что существенно искажает распределение второй оптической гармоники [23]. Экспериментально установлено, что даже кратковременное (~30 с) воздействие электронов с энергией 5 кВ приводит к необратимому изменению доменной структуры ЦТС, что делает невозможным корректное сопоставление оптических и электронно-микроскопических данных.

Пространственные карты распределения интенсивности ГВГ, полученные методом сканирующей нелинейной микроскопии (рис. 5б, 5г), позволяют надежно идентифицировать морфологические дефекты, включая складки и трещины. В зонах, соответствующих таким дефектам, регистрируется локальное увеличение интенсивности сигнала. Усиление может быть связано с нарушением локальной centrosymmetрии либо с краевыми эффектами, обусловленными усилением нелинейной оптической восприимчивости вблизи границ доменов или у краев кристаллической области [24], а также увеличением толщины пленки.

Шестилучевая азимутальная зависимость интенсивности второй оптической гармоники в тонких MoS_2 (рис. 5в, д) обусловлена кристаллографической симметрией материала. В случае нецентросимметричного 3R-политипа, а также при четном числе слоев,

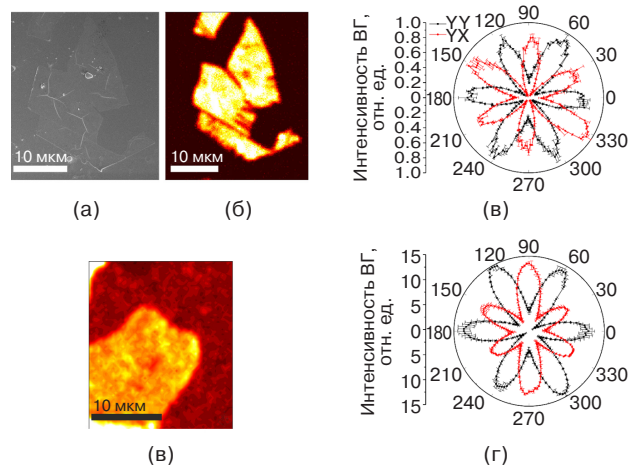


Рис. 5. Изображение кристаллита MoS_2 на подложке Si/SiO_2 , полученное при помощи СЭМ (а); двумерная карта распределения второй гармоники (ВГ) в квазидвумерных кристаллитах MoS_2 на подложках Si/SiO_2 и ЦТС (б), (г); азимутальные зависимости интенсивности ВГ в кристаллитах MoS_2 на подложках Si/SiO_2 и ЦТС (в), (д) в параллельной (Y) и скрещенной (X) комбинациях поляризации излучения накачки и выделенной компоненты поля ВГ

структура характеризуется точечной группой симметрии C_{3v} . Это приводит к выраженной шестилучевой форме зависимости интенсивности ВГ от азимутального угла вращения образца [25, 26]. В эксперименте наблюдается совпадение фаз максимумов интенсивности по всем точкам флейка, что указывает на монокристаллическую природу пленки и однородную ориентацию кристаллографических осей.

В большинстве исследованных областей пленок MoS_2 наблюдается равномерное распределение интенсивности ГВГ, что свидетельствует о низкой плотности морфологических дефектов и высоком кристаллическом качестве материала. Однородность сигнала подтверждает отсутствие значимых границ зерен, складок и трещин на основной площади флейка, а также указывает на минимальное влияние политипизма – в частности, доминирование нецентросимметричного 3R-политипа, вносящего наибольший вклад в ГВГ-сигнал.

Для объективного сравнения эффективности формирования квазидвумерных пленок на различных подложках проведен статистический анализ морфологических параметров более 300 созданных кристаллитов. Одним из ключевых критериев в данном случае служит распределение площадей отдельных кристаллитов, поскольку этот параметр определяет пригодность материала для дальнейших применений и непосредственно зависит как от выбранного метода эксфолиации, так и от свойств подложки.

Гистограммы распределения площади квази-двумерных кристаллитов MoS_2 , полученных методом GAE, представлены на рис. 6 и демонстрируют существенное различие между подложками Si/SiO_2 (рис. 6а) и ЦТС (рис. 6б). При этом важно, что в статистическую выборку включены кристаллиты с площадью более 0.2 мкм^2 и толщиной менее или равной 7 нм (~ 10 монослоев), что соответствует переходной области между квантоворазмерными и объемными свойствами. Нижний порог площади выбран исходя из технологических требований: меньшие кристаллиты непригодны для создания функциональных устройств из-за ограничений литографии и формирования электродных структур.

Для подложки Si/SiO_2 более 25% визуализированных кристаллитов имеют площадь свыше 65000 мкм^2 , что на четыре порядка превышает типичные результаты обычной эксфолиации ($< 0.5 \text{ мкм}^2$) [27]. На подложке ЦТС распределение смещено в область меньших значений: площадь наибольших 25% кристаллитов составляет лишь 3000 мкм^2 , что связано с повышенной шероховатостью поверхности ($R_a = 1.09 \text{ нм}$) и, вследствие этого, неоднородным контактом между пленкой и подложкой. Принципиально важно, что на ЦТС при использовании стандартной механической эксфолиации не удалось зафиксировать ни одного кристаллита площадью более 1 мкм^2 .

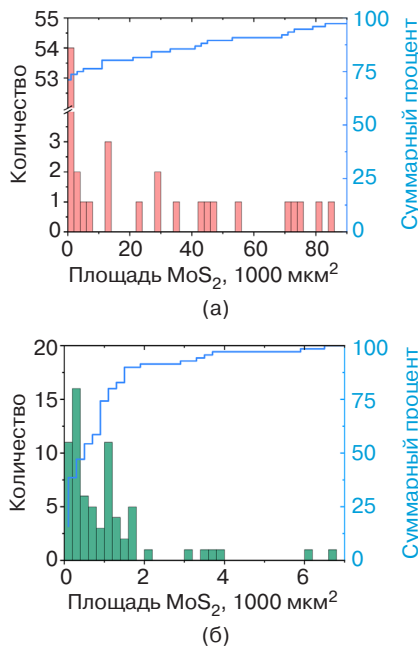


Рис. 6. Гистограмма площади двумерных кристаллитов MoS_2 на подложке (а) Si/SiO_2 и (б) ЦТС

Таким образом, метод золото-ассистированной эксфолиации обеспечивает формирование протяженных и качественных монослоев MoS_2 не только на стандартных, но и на текстурированных подложках, где другие подходы оказываются неэффективными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы впервые продемонстрирована возможность получения протяженных и высококачественных монослоев MoS_2 на подложках с выраженной зернистой и текстурированной структурой, таких как сегнетоэлектрические пленки ЦТС. Метод золото-ассистированной эксфолиации позволил формировать кристаллиты площадью до 3000 мкм^2 на ЦТС и свыше 65000 мкм^2 на стандартных подложках Si/SiO_2 , что на несколько порядков превышает результаты, достижимые традиционной механической эксфолиацией, где на текстурированных подложках не удается получить ни одного кристаллита площадью более 1 мкм^2 . Кристалличность и однородность полученных слоев подтверждены методами АСМ и нелинейно-оптической микроскопии.

Полученные результаты открывают новые перспективы для интеграции двумерных полупроводников в функциональные устройства, такие как FeFET и мемристоры, где требуется перенос слоев на сложные и неровные подложки. Методика GAE может быть универсализирована для широкого спектра 2D-материалов и различных типов функциональных поверхностей. Таким образом, золото-ассистированная эксфолиация представляет собой эффективный и воспроизводимый инструмент для создания протяженных двумерных пленок с контролируемыми морфологическими и структурными характеристиками, в т.ч. на подложках, ранее считавшихся непригодными для подобных задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Основные результаты исследования были получены при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-79-10304) в части разработки методики создания двумерных пленок, а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFZ-2024-0047) – в части экспериментальных методик исследования свойств созданных структур.

ACKNOWLEDGMENTS

The main results of the study were obtained with the support of the Russian Science Foundation (project No. 24-79-10304) in terms of developing a method for creating two-dimensional films, as well as the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSFZ-2024-0047) in terms of experimental methods for studying the properties of the created structures.

Вклад авторов

Е.И. Жемеров – разработка методологии, обзор литературы, проведение эксперимента, интерпретация и обобщение результатов, подготовка первоначального варианта рукописи.

А.А. Гуськов – разработка методологии, проведение эксперимента, подготовка, интерпретация и обобщение результатов, подготовка первоначального варианта рукописи, подготовка статьи к публикации.

Е.А. Булавинцева, Д.С. Серегин – разработка методологии, создание образцов.

С.Д. Лавров – создание концепции и методологии исследования, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование текста рукописи, общее руководство.

Все авторы прочитали и согласовали публикуемый вариант рукописи.

Authors' contributions

E.I. Zhemerov – methodology development, literature review, conducting experiments, interpretation and generalization of results, preparation of the initial manuscript draft.

A.A. Guskov – methodology development, conducting experiments, interpretation and generalization of results, preparation of the initial manuscript draft, preparation of the article for publication.

E.A. Bulavintseva, D.S. Seregin – methodology development, sample preparation.

S.D. Lavrov – creation of research concept and methodology, preparation of the initial manuscript draft, manuscript text editing, general supervision.

All authors read and approved the published version of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Ziewer J., Ghosh A., Hanušová M., Pirker L., Frank O., Velický M., Grüning M., Huang F. Strain-Induced Decoupling Drives Gold-Assisted Exfoliation of Large-Area Monolayer 2D Crystals. *Adv. Mater.* 2025;37(14):2419184. <https://doi.org/10.1002/adma.202419184>
- Rodríguez A., Çakıroğlu O., Li H., Carrascoso F., Mompean F., Garcia-Hernandez M., Munuera C., Castellanos-Gomez A. Improved Strain Transfer Efficiency in Large-Area Two-Dimensional MoS₂ Obtained by Gold-Assisted Exfoliation. *J. Phys. Chem. Lett.* 2024;15(24):6355–6362. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.4c00855>
- Huang Y., Pan Y.-H., Yang R., Bao L.-H., Meng L., Luo H.-L., Cai Y.-Q., Liu G.-D., Zhao W.-J., Zhou Z., et al. Universal mechanical exfoliation of large-area 2D crystals. *Nat. Commun.* 2020;11(1):2453. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16266-w>
- Ding S., Lin F., Jin C. Quantify point defects in monolayer tungsten diselenide. *Nanotechnology.* 2021;32(25):255701. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abeb2>
- Edelberg D., Rhodes D., Kerelsky A., Kim B., Wang J., Zangiabadi A., Kim C., Abhinandan A., Ardelean J., Scully M., et al. Approaching the Intrinsic Limit in Transition Metal Diselenides via Point Defect Control. *Nano Lett.* 2019;19(7):4371–4379. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00985>
- Wu K., Wang H., Yang M., Li L., Sun Z., Hu G., Song Y., Han X., Guo J., Wu K., et al. Gold-Template-Assisted Mechanical Exfoliation of Large-Area 2D Layers Enables Efficient and Precise Construction of Moiré Superlattices. *Adv. Mater.* 2024;36(23):2313511. <https://doi.org/10.1002/adma.202313511>
- Dai Y., Huang X., Han X., Guo J., Xu X., Wang L., Liu K., Song N., Wang Y., Huang Y. Recent Progress of Mechanical Exfoliation and the Application in the Study of 2D Materials. In: Wee A., Yin X., Tang C.S. (Eds.). *Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides*. Wiley; 2024. P. 211–265. <https://doi.org/10.1002/9783527838752.ch6>
- Panasci S.E., Schilirò E., Migliore F., Cannas M., Gelardi F.M., Roccaforte F., Giannazzo F., Agnello S. Substrate impact on the thickness dependence of vibrational and optical properties of large area MoS₂ produced by gold-assisted exfoliation. *Appl. Phys. Lett.* 2021;119(9):093103. <https://doi.org/10.1063/5.0062106>
- Wan Y., Li E., Yu Z., Huang J.-K., Li M.-J., Chou A.-S., Lee Y.-T., Lee C.-J., Hsu H.-C., Zhan Q., et al. Low-defect-density WS₂ by hydroxide vapor phase deposition. *Nat. Commun.* 2022;13(1):4149. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31886-0>
- Velický M., Donnelly G.E., Hendren W.R., McFarland S., Scullion D., DeBenedetti W.J.I., Correa G.C., Han Y., Wain A.J., Hines M.A., et al. Mechanism of Gold-Assisted Exfoliation of Centimeter-Sized Transition-Metal Dichalcogenide Monolayers. *ACS Nano.* 2018;12(10):10463–10472. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b06101>
- Koenig S.P., Boddeti N.G., Dunn M.L., Bunch J.S. Ultrastrong adhesion of graphene membranes. *Nature Nanotech.* 2011;6(9):543–546. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.123>
- Huang Y., Sutter E., Shi N.N., Zheng J., Englund T.Y.D., Gao H.-J., Sutter P. Reliable Exfoliation of Large-Area High-Quality Flakes of Graphene and Other Two-Dimensional Materials. *ACS Nano.* 2015;9(11):10612–10620. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b04258>
- Котова Н.М., Воротилов К.А., Серегин Д.С., Сигов А.С. Роль прекурсоров в процессе формирования тонких пленок цирконата-титаната свинца. *Неорганические материалы.* 2014;50(6):661–666. <https://doi.org/10.7868/S0002337X14060104>
Kotova N.M., Vorotilov K.A., Seregin D.S., Sigov A.S. Role of precursors in the formation of lead zirconate titanate thin films. *Inorg. Mater.* 2014;50:612–616. <https://doi.org/10.1134/S0020168514060107>
[Original Russian Text: Kotova N.M., Vorotilov K.A., Seregin D.S., Sigov A.S. Role of precursors in the formation of lead zirconate titanate thin films. *Neorganicheskie materialy.* 2014;50(6):661–666 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0002337X14060104>]
- Brotons-Alcázar I., Terreblanche J.S., Giménez-Santamarina S., Gutiérrez-Finol G.M., Ryder K.S., Forment-Aliaga A., Coronado E. Atomic Force Microscopy beyond Topography: Chemical Sensing of 2D Material Surfaces through Adhesion Measurements. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2024;16(15):19711–19719. <https://doi.org/10.1021/acsmi.3c19254>

15. Mendez-Gonzalez D., Melle S., Calderón O.G., Laurenti M., Cabrera-Granado E., Egatz-Gómez A., López-Cabarcos E., Rubio-Retama J., Díaz E. Control of upconversion luminescence by gold nanoparticle size: from quenching to enhancement. *Nanoscale*. 2019;11(29):13832–13844. <https://doi.org/10.1039/c9nr02039j>
16. Bhanu U., Islam M.R., Tetard L., Khondaker S.I. Photoluminescence quenching in gold – MoS₂ hybrid nanoflakes. *Sci Rep*. 2014 Jul 4;4:5575. <https://doi.org/10.1038/srep05575>
17. Mak K.F., Lee C., Hone J., Shan J., Heinz T.F. Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor. *Phys. Rev. Lett*. 2010;105(13):136805. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.105.136805>
18. Srimuk P., Wang L., Budak Ö., Presser V. High-performance ion removal via zinc–air desalination. *Electrochem. Commun*. 2020;115:106713. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106713>
19. Vasi S., Giofrè S.V., Perathoner S., Mallamace D., Abate S., Wanderlingh U. X-ray Characterizations of Exfoliated MoS₂ Produced by Microwave-Assisted Liquid-Phase Exfoliation. *Materials*. 2024;17(16):3887. <https://doi.org/10.3390/ma17163887>
20. Kim C.J., Yoon D.S., Lee J.S., Choi C.G., No K. A Study on the Microstructure of Preferred Orientation of Lead Zirconate Titanate (PZT) Thin Films. *J. Mater. Res*. 1997;12(4):1043–1047. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0145>
21. Popescu D.G., Husanu M.A., Constantinou P.C., et al. Experimental Band Structure of Pb(Zr,Ti)O₃: Mechanism of Ferroelectric Stabilization. *Adv. Sci*. 2023;10(6):e2205476. <https://doi.org/10.1002/advs.202205476>
22. Beklešovas B., Iljinas A., Stankus V., et al. Structural, Morphologic, and Ferroelectric Properties of PZT Films Deposited through Layer-by-Layer Reactive DC Magnetron Sputtering. *Coatings*. 2022;12(6):717. <https://doi.org/10.3390/coatings12060717>
23. Kokhanchik L.S., Gainutdinov R.V., Lavrov S.D., Mishina E.D., Volk T.R. E-Beam Recording of Domain Structures on the Nonpolar Surface of LiNbO₃ Crystals at Different SEM Voltages and their Investigation by PFM and SHG Microscopy. *Ferroelectrics*. 2015;480(1):49–57. <https://doi.org/10.1080/00150193.2015.1012419>
24. Мишина Е.Д., Шерстюк Н.Э., Шестакова А.П., Лавров С.Д., Семин С.В., Сигов А.С., Митиоглу А., Ангел С., Кулюк Л. Краевые эффекты в генерации второй гармоники в наноразмерных слоях дихалькогенидов переходных металлов. *Физика и техника полупроводников*. 2015;49(6):810–816.
Mishina E.D., Sherstyuk N.E., Shestakova A.P., Lavrov S.D., Semin S.V., Sigov A.S., Mitioglu A., Anghel S., Kulyuk L. Edge effects in second-harmonic generation in nanoscale layers of transition-metal dichalcogenides. *Semiconductors*. 2015;49(6):791–796.
[Original Russian Text: Mishina E.D., Sherstyuk N.E., Shestakova A.P., Lavrov S.D., Semin S.V., Sigov A.S., Mitioglu A., Anghel S., Kulyuk L. Edge effects in second-harmonic generation in nanoscale layers of transition-metal dichalcogenides. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2015;49(6):810–816 (in Russ.).]
25. Li Z.-Y., Cheng H.-Y., Kung S.-H., Yao H.-C., Inbaraj C.R.P., Sankar R., Ou M.-N., Chen Y.-F., Lee C.-C., Lin K.-H. Uniaxial Strain Dependence on Angle-Resolved Optical Second Harmonic Generation from a Few Layers of Indium Selenide. *Nanomaterials*. 2023;13(4):750. <https://doi.org/10.3390/nano13040750>
26. Li Y. Measurement of the Second-Order Nonlinear Susceptibility and Probing Symmetry Properties of Few-Layer MoS₂ and h-BN by Optical Second-Harmonic Generation. In: *Probing the Response of Two-Dimensional Crystals by Optical Spectroscopy*. Springer Theses; 2016. P. 45–54. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25376-3_6
27. Desai S.B., Madhvapathy S.R., Amani M., Kiriya D., Hettick M., Tosun M., Zhou Y., Dubey M., Ager J.W., Chrzan D., et al. Gold-Mediated Exfoliation of Ultralarge Optoelectronically-Perfect Monolayers. *Adv. Mater*. 2016;28(21):4053–4058. <https://doi.org/10.1002/adma.201506171>

Об авторах

Жемеров Евгений Игоревич, студент, стажер-исследователь, лаборатория физики для нейроморфных вычислительных систем, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhemerov@mirea.ru. ResearcherID LLM-2528-2024, SPIN-код РИНЦ 6300-2743, <https://orcid.org/0009-0002-0507-6242>

Гуськов Андрей Александрович, аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория физики для нейроморфных вычислительных систем, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, SPIN-код РИНЦ 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Булавинцева Елизавета Александровна, студент, сотрудник лаборатории физики для нейроморфных вычислительных систем, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Liza12.07.2002@gmail.com. ResearcherID LLM-2612-2024, <https://orcid.org/0009-0009-5310-3146>

Серегин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., начальник отдела, Научно-образовательный центр «Технологический центр», Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: d_seregin@mirea.ru. Scopus Author ID 55643557800, ResearcherID R-6023-2016, SPIN-код РИНЦ 4960-6761, <https://orcid.org/0000-0002-6371-9632>

Лавров Сергей Дмитриевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, лаборатория физики для нейроморфных вычислительных систем; доцент, кафедра наноэлектроники, Институт перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, SPIN-код РИНЦ 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

About the Authors

Evgeny I. Zhemerov, Student, Researcher Intern, Laboratory of Physics for Neuromorphic Computing Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhemerov@mirea.ru. ResearcherID LLM-2528-2024, RSCI SPIN-code 6300-2743, <https://orcid.org/0009-0002-0507-6242>

Andrey A. Guskov, Graduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Physics for Neuromorphic Computing Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, RSCI SPIN-code 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Elizaveta A. Bulavintseva, Student, Researcher Intern, Laboratory of Physics for Neuromorphic Computing Systems, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: Liza12.07.2002@gmail.com. ResearcherID LLM-2612-2024, <https://orcid.org/0009-0009-5310-3146>

Dmitry S. Seregin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, Research and Education Center “Technology Center”, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: d_seregin@mirea.ru. Scopus Author ID 55643557800, ResearcherID R-6023-2016, RSCI SPIN-code 4960-6761, <https://orcid.org/0000-0002-6371-9632>

Sergei D. Lavrov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Physics for Neuromorphic Computing Systems; Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, RSCI SPIN-code 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>