

Сверхбыстрый высокочувствительный гибкий детектор инфракрасного излучения

А.Р. Рымжина¹, П. Шарма^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,3}, Д.Н. Артемьев¹, К.Н. Тукмаков¹, В.С. Павельев^{1,3},
В.И. Платонов¹, П. Мишра^{1,4}, Н. Трипати¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

² School of Electronics Engineering (SENSE), Vellore Institute of Technology (VIT),
632014, India, Vellore, Tamil Nadu;

³ Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151;

⁴ Centre for Nanoscience and Nanotechnology, Jamia Millia Islamia (A Central University),
110025, India, Jamia Nagar, New Delhi

Аннотация

Проведен сравнительный анализ гибких фотодетекторов на основе листов TiS_2 и функционализированных нитратом серебра листов TiS_2 . Листы TiS_2 синтезированы методом химического транспорта, обработаны ультразвуком в течение 1 ч и осаждены между хромовыми встречно-штыревыми электродами на поверхности гибкой подложки из полиэтилен-терефталата. Характеристики изготовленных фотодетекторов определены путём их равномерного освещения 1064 нм лазерным излучением с перестраиваемой мощностью. Явно прослеживается значительное влияние частиц нитрата серебра, рассеянных в объеме чувствительного материала фотодетектора, на его эффективность. Продемонстрировано превосходство фотодетектора на основе функционализированных листов TiS_2 . Данный фотодетектор демонстрирует значительный отклик для всех использованных мощностей излучения (11,6, 19,6, 51, 100 и 150 мВт/см²), показывает малое время отклика ($0,23 \pm 0,01$ с) и восстановления ($0,49 \pm 0,02$ с) вкуче с высокой чувствительностью ($(260 \pm 7) \cdot 10^3$ А/Вт), квантовой эффективностью ($(303 \pm 8) \cdot 10^3$ А/Вт·нм) и обнаружительной способностью ($(3,10 \pm 0,09) \cdot 10^{13}$ Джонс) при мощности падающего излучения 11,6 мВт/см². Полученные результаты могут быть использованы для разработки и оптимизации современных оптоэлектронных устройств.

Ключевые слова: гибкий фотодетектор, дихалькогениды переходных металлов, TiS_2 , инфракрасное излучение, диэлектрофорез, химический транспорт.

Цитирование: Рымжина, А.Р. Сверхбыстрый высокочувствительный гибкий детектор инфракрасного излучения / А.Р. Рымжина, П. Шарма, В.В. Подлипов, Д.Н. Артемьев, К.Н. Тукмаков, В.С. Павельев, В.И. Платонов, П. Мишра, Н. Трипати // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 363-370. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1325.

Citation: Rymzhina AR, Sharma P, Podlipnov VV, Artemyev DN, Tukmakov KN, Pavelyev VS, Platonov V, Mishra P, Tripathi N. Ultra-fast highly sensitive flexible infrared detector. Computer Optics 2024; 48(3): 363-370. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1325.

Введение

Оптические детекторы являются ключевым компонентом многих ежедневно используемых устройств [1–2]. Сегодня производство ткани со встроенными гибкими электронными устройствами представляет собой популярное направление исследований [3].

Основная проблема существующей технологии ИК-детектирования заключается в том, что мониторинг в ИК-диапазоне с приемлемым разрешением на больших расстояниях требует большого массива чувствительных элементов. Если же используется небольшой массив чувствительных элементов, то время обнаружения увеличивается, что не удовлетворяет потребностям современных оптоэлектронных устройств [4]. Сегодня быстро развивается потребность в гибких фотодетекторах для носимой электро-

ники и летательных аппаратов [2]. Гибкие датчики будут играть ключевую роль в будущей медицинской диагностике и физиологическом мониторинге, а также для ранней диагностики путем непрерывного мониторинга состояния здоровья пациентов. ИК-детекторы способны измерять не только температуру окружающих объектов, но и состав газа путем отслеживания способности проверяемого газа поглощать/снижать интенсивность ИК-излучения. Гибкие фотодетекторы могут принимать необходимые изгибы без изменения технологических процессов, как происходит в случае с фотодетекторами на жестких и хрупких подложках. Большие непрерывные области гибких фотодетекторов на космическом корабле облегчат измерения температуры и определение состава газов, что критически важно для оценки остаточной атмосферы [2]. Были проведены многочисленные ис-

следования по разработке неплоских ИК-матриц с использованием чувствительных элементов из кремния и MoS_2 [5]. Преимущественно используемые чувствительные элементы фотодетекторов основаны на кристаллических эпитаксиальных материалах. Для выращивания таких структур и создания соответствующих устройств требуются жесткие и хрупкие подложки с согласованной решеткой. По этой причине данные материалы нельзя сгибать или сжимать. Известны гибкие ИК-детекторы, основанные на композите из перовскита и сопряженного полимера [6], PbS и углеродных квантовых точек/графене [7], пленке из микросфер из листов SnS_2 [8], графене [7, 9], нанопроволоках SbSe_3 [10], восстановленном оксиде графена [11], графеновых нанолентах [12] и коллоидных квантовых точках HgTe [13].

Тем не менее большая часть исследованных материалов демонстрирует ограниченные спектральные диапазоны чувствительности (< 1 мкм) [7–13], низкий отклик [6, 8–12] и низкую скорость отклика [6–12], что препятствует их практическому применению. Сегодня ведутся активные исследования диалкогенидов переходных металлов (ДПМ) для разработки ИК-детекторов с улучшенными характеристиками фотодетектирования [14–37]. Причиной такого интереса к ДПМ стал ряд их преимуществ по сравнению с другими материалами для фотодетектирования. Например, атомарная толщина делает такие материалы почти прозрачными, что может быть использовано при создании «умной ткани». Кроме того, такая малая толщина также отвечает за эффекты размерного квантования вне плоскости и вызывает сильно связанные экситоны, которые приводят к увеличению эффективности поглощения излучения [14]. Более того, ширина запрещенной зоны (ШЗЗ) ДПМ может быть отрегулирована путём изменения количества слоев материала для модуляции края оптического поглощения [14]. Сегодня широко изучаются такие диалкогениды переходных металлов, как MoS_2 [15], MoSe_2 [16], WS_2 [17], WSe_2 [18], GaTe [19], GaSe [20], GaS [21], In_2Se_3 [22], InSe [23], SnS_2 [8], TiS_3 [24], ZrS_3 [25], HfS_3 [26] и черный фосфор (BP) [27]. Фотодетекторы на основе однослойного MoS_2 могут обнаруживать только излучение видимого спектра. В случае с малослойным MoS_2 спектральный диапазон расширяется до ближнего ИК [15]. Фотодетекторы на основе MoSe_2 демонстрируют чувствительность от 0,26 мА/Вт до 13 мА/Вт [16, 28]. Главный недостаток этого материала заключается в том, что время отклика фотодетектора на его основе составляет несколько десятков мс. Часть широко исследуемых ДПМ работает в УФ-видимом диапазоне [29, 21]. Некоторые из исследованных ДПМ демонстрируют отклик преимущественно в видимом диапазоне спектра [29, 19, 26]. Многие ДПМ могут работать как чувствительные элементы в диапазоне от видимого до ближнего ИК-излучения [28, 23, 8, 24, 25]. Некоторые ДПМ могут

перекрывать более широкий спектральный диапазон излучения, такой как УФ-ближний ИК [22] и видимый-ИК [28]. Наноленты TiS_3 , соединения A^3B^6 и A^4B^6 , такие как GaTe или SnS_2 , демонстрируют как большую чувствительность, так и малое время отклика [28–29]. Основные проблемы упомянутых материалов: узкий рабочий диапазон длин волн, в частности, малое поглощение в ИК-диапазоне спектра, большое время отклика. Кроме того, кремниевая технология, использованная в [22, 23, 28], обладает рядом недостатков, одним из которых является жесткость и хрупкость устройств.

Для преодоления упомянутых проблем с существующими материалами необходимо исследовать новые материалы для фотодетектирования. Одним из перспективных материалов для разработки гибких ИК-детекторов является дисульфид титана (TiS_2). Главным образом, интерес к данному материалу возник из-за величины его прямой ШЗЗ и из-за эффектов размерного квантования вне плоскости, приводящих к увеличению эффективности оптического поглощения [14]. Меньшая ШЗЗ материала говорит о том, что такой материал сможет детектировать излучение с меньшей энергией фотона, то есть с большей длиной волны. Прямая ШЗЗ TiS_2 меньше, чем у упомянутых выше материалов и находится в диапазоне от 0,2 до 0,9 эВ, что свидетельствует о ее зависимости от структуры и о возможности поглощать излучение в ИК-диапазоне спектра [30–32]. TiS_2 в однослойной и малослойной формах представляет собой прозрачный материал, который может найти применение при изготовлении ткани со встроенными электронными компонентами [30]. Кроме того, процесс изготовления устройств на основе ДПМ преимущественно осуществляется методом механического отшелушивания.

Целью данной работы является решение упомянутых проблем путём разработки гибкого ИК-фотодетектора на основе нового материала TiS_2 .

1. Синтез листов TiS_2 и их функционализация

Листы TiS_2 были изготовлены по технологии химического транспорта. Для этого порошок титана (99,95%) и серы (99,99%) смешивают в соотношении 1:2, отбирают в кварцевую ампулу, запаивают при давлении 2×10^{-5} мбар и выдерживают 24 ч при температуре 650°C. Далее ампула остывает при комнатной температуре, после чего ее вскрывают и собирают синтезированный материал. Морфология, структурное качество и элементный состав полученного материала проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с полевым эмиттером, просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) высокого разрешения, рамановской спектроскопии, дифракционного рентгеновского анализа и энергорассеивающей рентгеновской спектроскопии. Подробности анализа данного материала представлены в одной из наших предыдущих работ [33]. На рис. 1 представлено изображение синтезиро-

ванных структур TiS_2 , представляющих собой листы правильных шестиугольников.

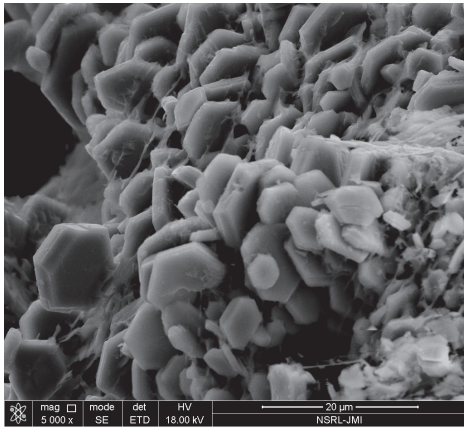


Рис. 1. Синтезированные листы TiS_2 . Изображение получено с помощью СЭМ с полевым эмиттером

Далее была проведена функционализация TiS_2 нитратом серебра (AgNO_3). Для этого 25 мг TiS_2

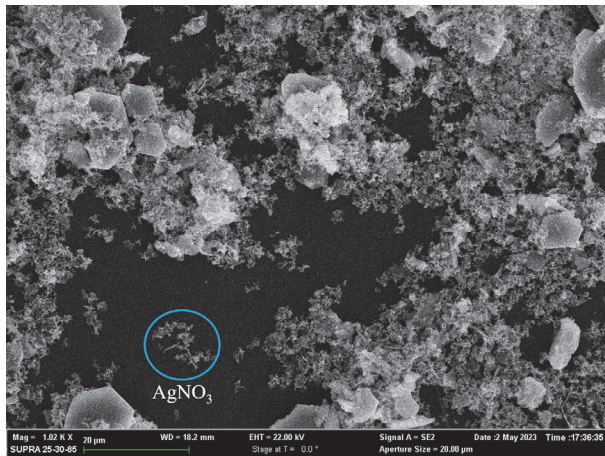


Рис. 2. СЭМ-изображение листов TiS_2 после функционализации нитратом серебра (а) и рамановские спектры листов TiS_2

до (линия 1) и после (линия 2) функционализации нитратом серебра (б)

смешали с 1 мг AgNO_3 в 50 мл изопропилового спирта и обработали ультразвуком в течение 1 ч. Далее раствор нанесли каплями на подложки из кремния для последующего анализа с помощью СЭМ и рамановской спектроскопии (рис. 2а,б). Как видно из рис. 2а, AgNO_3 равномерно распределился в объеме структур TiS_2 . На рамановском спектре (рис. 2б) отчетливо видны две рамановские активные моды TiS_2 , состоящие из плоскостной колебательной моды (E_g) при $\sim 210 \text{ см}^{-1}$ и внеплоскостной моды (A_{1g}) при $\sim 350 \text{ см}^{-1}$ и «плечевой пик» Sh при $\sim 377 \text{ см}^{-1}$ при использовании 532 нм возбуждающего лазера, что согласуется с ранее сообщаемыми результатами для чистого TiS_2 [33]. Из рамановских спектров образцов видно, что после функционализации величина и ширина пиков TiS_2 значительно увеличилась, что говорит о существенном влиянии AgNO_3 на свойства полученного композита. Таким образом, проведенный анализ подтвердил функционализацию листов TiS_2 нитратом серебра.

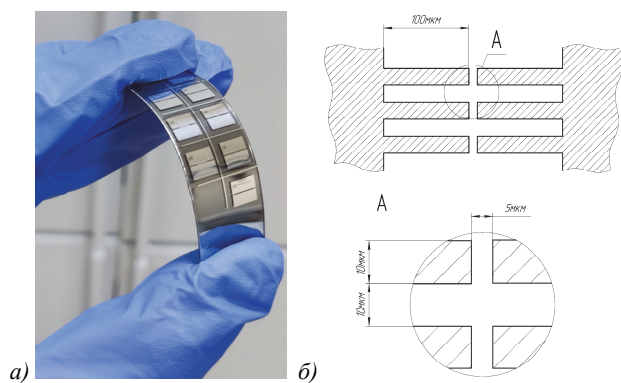
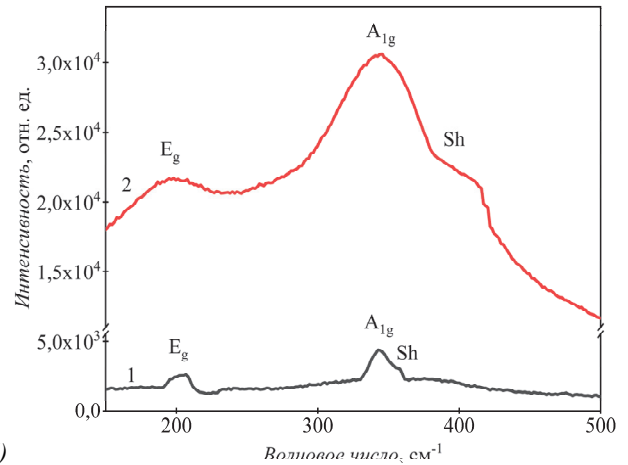


Рис. 3. Хромовые чипы на гибкой ПЭТ-подложке (а) и их геометрия (б)

2. Разработка устройств

Гомогенные дисперсии чистых и функционализированных листов TiS_2 были подготовлены и обработаны 1 ч ультразвуком в изопропиловом спирте. Обработанные дисперсии наносили на гибкую подложку

со встречно-штыревыми электродами (ВШЭ). В качестве подложки фотодетектора взят полиэтилентерефталат (ПЭТ). ВШЭ из хрома (Cr) толщиной 100 нм изготовлены методом фотолитографии (рис. 3а). Геометрия и размеры ВШЭ представлены на рис. 3б.

Во время осаждения дисперсии между ВШЭ подавался переменный ток частотой 1 МГц при напряжении 10 В от пика до пика. Форма сигнала представляла собой меандр. Благодаря возникшему явлению диэлектрофореза листы TiS_2 выравнивались между ВШЭ.

3. Тестирование гибких фотодетекторов

Для проведения экспериментов по фотодетектированию использовался 1064 нм лазер с перестраиваемой мощностью. Чтобы исследовать влияние напряжения смещения на работу фотодетекторов, были проведены эксперименты по фотодетектированию при напряжениях 5, 7,5 и 10 В. Для этого фотодетектор был последовательно подключен к мультиметру и источнику питания. Далее на образец наводился пучок лазерного излучения.

При взаимодействии лазерного излучения с чувствительным материалом фотодетектора ток, регистрируемый мультиметром, скачкообразно возрастал. Когда ток выходил на плато, излучение перекрывалось перегородкой и ток скачкообразно возвращался на исходный уровень. Так был проведен ряд циклов детектирования излучения, после чего напряжение смещения изменялось и весь процесс измерений повторялся. Также были сняты вольтамперные характеристики (ВАХ) разработанных фотодетекторов. Для этого на образец подавалось напряжение от -10 В до 10 В с шагом $0,5$ В в секунду.

Ток, протекающий через образец, регистрировался мультиметром. ВАХ сняты в отсутствие излучения и при непрерывном освещении образца с плотностями мощности, использованными в экспериментах по фотодетектированию.

4. Обсуждение результатов

Из ВАХ фотодетектора на основе чистых листов TiS_2 (рис. 4а) видно, что с повышением плотности мощности излучения растет и ток, протекающий через чувствительный элемент фотодетектора.

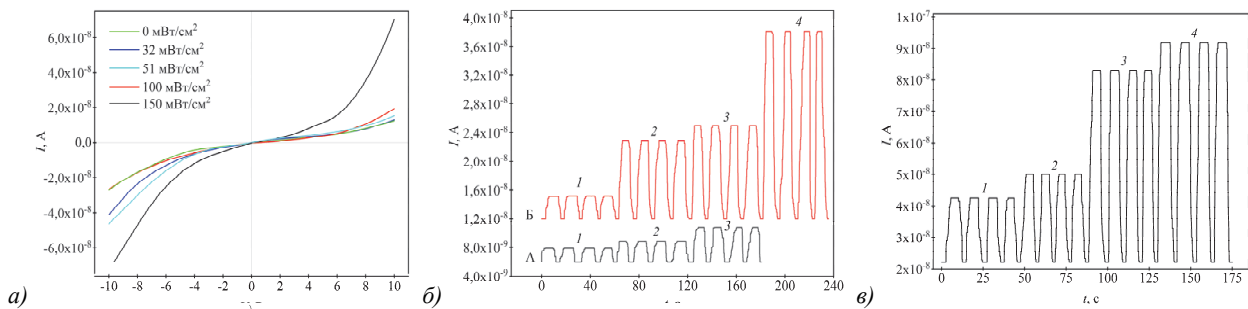


Рис. 4. ВАХ фотодетектора на основе листов TiS_2 (а) и изменение фототока в зависимости от плотности мощности падающего излучения по времени при напряжении смещения 5 В (линия А), $7,5$ В (линия Б) (б) и 10 В (в)

Существует три режима работы фотодетекторов: фотогальванический, фототермоэлектрический и фотопроводящий [28]. На рис. 4а нет тока короткого замыкания, фотодетектор равномерно освещается лазерным лучом, вследствие чего возникающие токи протекают в противоположных направлениях и компенсируют друг друга на разделе между чувствительным материалом и материалом контактов, что исключает возможность генерации фототока за счет фотогальванического и фототермоэлектрического эффектов [28]. Поэтому фототок данного фотодетектора генерируется за счет явления фотопроводимости.

ное значение чувствительности ($644,45 \pm 19,33$ А/Вт), квантовой эффективности ($752,49 \pm 22,57$ А/Вт·нм) и обнаружительной способности ($(7,68 \pm 0,23) \cdot 10^{10}$ Джонс) наблюдалось при плотности мощности излучения 32 мВт/см². Замечено, что указанные параметры уменьшаются с увеличением мощности излучения.

На рис. 4б, в представлены зависимости фототока по времени при облучении фотодетектора лазерным излучением различной мощности при различном напряжении смещения. Как видно из рис. 4б, в, разработанный фотодетектор стабилен и способен генерировать стабильный фототок в повторяющихся циклах детектирования. Резкие изменения фототока демонстрируют способность листов TiS_2 обнаруживать излучение различной мощности. На рис. 4б из линии А видно, что фотодетектор дает отклик на излучение мощностью 51 , 100 и 150 мВт/см² (линии 1, 2, 3) при напряжении 5 В. При увеличении напряжения смещения фотодетектор способен детектировать излучение более низкой мощности. Как видно из рис. 4б (линия Б) и рис. 4в, при напряжениях $7,5$ и 10 В фотодетектор способен детектировать излучение мощностью от 32 до 150 мВт/см² (линии 1–4). При повышении напряжения смещения наблюдался рост фототока. При напряжении 10 В и излучении мощностью 150 мВт/см² фототок составил $(3,38 \pm 0,10) \cdot 10^{-8}$ А. Время отклика и восстановления составило $2,43 \pm 0,07$ с и $1,22 \pm 0,03$ с соответственно. Максималь-

Далее были проведены исследования фотодетектора на основе листов TiS_2 , функционализированных $AgNO_3$ (TiS_2-AgNO_3) (рис. 5а, б). ВАХ, представленные на рис. 5а, подтверждают тот же механизм генерации фототока, что и у чистого образца TiS_2 . Однако токи на ВАХ у данного образца выше на 4 порядка. На рис. 5б представлены зависимости фототока по времени при облучении фотодетектора лазерным излучением различной мощности при различном напряжении смещения. Как видно из рис. 5б, разработанный фотодетектор хорошо стабилен и способен генерировать стабильный фототок в повторяющихся циклах детектирования. На рис. 5б линии 1–5 соответствуют плотностям мощности падающего излучения величиной $11,6$, $19,6$, 51 , 100 и 150 мВт/см². Из рис. 5б (линия А) видно, что разработанный фотодетектор способен обнаруживать излучение малой мощности даже при напряжении смещения 5 В. При повышении напряжения наблюдается увеличение фототока и темнового тока. При напряжении смещения 10 В и падающем излучении 150 мВт/см² фототок образца составил $0,14 \cdot 10^{-4} \pm 0,43 \cdot 10^{-6}$ А, что в 426 раз выше, чем у чистого образца TiS_2 . Время отклика и восстановления фотодетектора составило $0,23 \pm 0,01$ с и $0,49 \pm 0,02$ с. Отношение уровней тока во включенном и выключенном состояниях обоих (TiS_2-AgNO_3 и чистого TiS_2) фотодетекторов лежит в диапазоне $1,5$.

Максимальное значение чувствительности $((260 \pm 7) \cdot 10^3 \text{ А/Вт})$, квантовой эффективности $((303 \pm 8) \cdot 10^3 \text{ А/Вт}\cdot\text{нм})$ и обнаружительной способности $((3,10 \pm 0,09) \cdot 10^{13} \text{ Джонс})$ фотодетектора на $\text{TiS}_2\text{-AgNO}_3$ наблюдалось при мощности излучения $11,6 \text{ мВт/см}^2$.

Сравнение полученных данных позволяет заключить, что фотодетектор на основе $\text{TiS}_2\text{-AgNO}_3$ значи-

тельно более эффективен и чувствителен по сравнению с фотодетектором на чистых листах TiS_2 из-за возникновения плазмонных эффектов [34].

Сравнение характеристик созданного фотодетектора с характеристиками известных фотодетекторов на основе низкоразмерных материалов приведено в табл. 1.

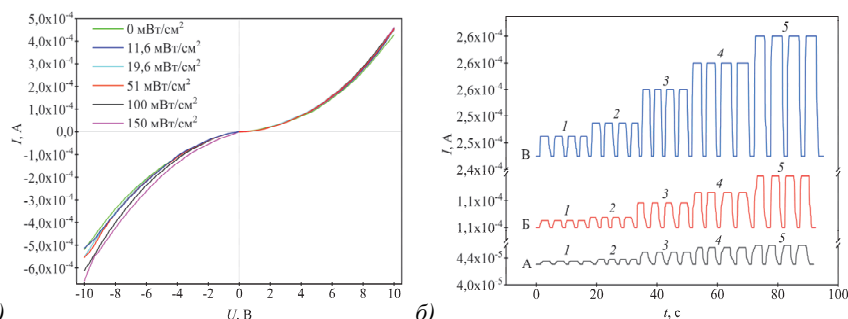


Рис. 5. ВАХ фотодетектора на основе функционализированных AgNO_3 листов TiS_2 (а) и изменение фототока в зависимости от мощности падающего излучения по времени при напряжении смещения 5 В (линия А), 7,5 В (линия Б) и 10 В (линия В) (б)

Табл. 1. Сравнительная таблица некоторых материалов для фотодетектирования

№	Материал	Длина волны, нм	Плотность мощности, мВт/см ²	Фототок, А	Время отклика, с	Время восстановления, с	Чувствительность, А/Вт	Обнаружительная способность, Джонс	Источник
1.	$\text{TiS}_2 + 1 \text{ мкг AgNO}_3$	1064	11,6	$0,14 \cdot 10^{-4} \pm 0,43 \cdot 10^{-6}$	$0,23 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,02$	$260 \cdot 10^3 \pm 7 \cdot 10^3$	$3,10 \cdot 10^{13} \pm 0,09 \cdot 10^{13}$	Данная работа
2.	Малослойный TiS_2	455	79,2	$13,414 \cdot 10^{-6}$	0,3	0,18	$1,174 \cdot 10^4$	$3,039 \cdot 10^{11}$	[33]
3.	Выровненные наноленты TiS_3	1064	340	$12,76 \cdot 10^{-3}$	1,53	0,74	$5,22 \cdot 10^2$	$1,69 \cdot 10^9$	[35]
4.	Невыровненные наноленты TiS_3	405	810	$3 \cdot 10^{-9}$	8 ± 2	8 ± 2	$3,8 \cdot 10^{-3}$	-	[36]
5.	Монослойный MoS_2/Si ПТ	532	0,13	$10 \cdot 10^{-6}$	~ 20	~ 3	780	-	[37]
6.	Многослойный MoS_2/Si ПТ	532	2	$3,31 \cdot 10^{-6}$	~ 1	~ 1	342,6	-	[38]
7.	Многослойный MoS_2/Si ПТ	633	50	$\sim 6 \cdot 10^{-9}$	~ 1	~ 1	0,12	$\sim 5 \cdot 10^{10}$	[39]
8.	MoS_2 ПТ	550	52,5	$\sim 1 \cdot 10^{-6}$	5	65	~ 3	-	[40]
9.	$\text{MoS}_2/\text{ReS}_2$	633	8,15	$\sim 45 \cdot 10^{-9}$	~ 25	~ 40	6,75	-	[41]
10.	$\text{SnSe}_2/\text{MoS}_2$	500	4,51	$\sim 7 \cdot 10^{-6}$	0,2	0,6	$9,1 \cdot 10^3$	$9,3 \cdot 10^{10}$	[42]
11.	Монослойный WS_2	500	3,68	$\sim 50 \cdot 10^{-9}$	0,37	5,2	3,07	-	[43]
12.	$\text{PdSe}_2/\text{WS}_2$	1550	74,0	$\sim 0,6 \cdot 10^{-9}$	0,93	0,97	$0,019 \cdot 10^{-3}$	-	[44]
13.	$\text{ReS}_2/\text{ReSe}_2$	633	1,550	$\sim 0,03 \cdot 10^{-6}$	4,1	4,7	$1,1 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^{15}$	[45]
14.	$\text{MoS}_2/\text{ReS}_2$	633	8,15	$\sim 45 \cdot 10^{-9}$	~ 25	~ 40	6,75	-	[41]
15.	ReSe_2	808	566	$0,432 \cdot 10^{-6}$	5,47	8,41	2,98	-	[46]
16.	p-MoTe ₂	220	11	$0,11 \cdot 10^{-6}$	6	6,4	~ 200	-	[47]
17.	Обработанный n-MoTe ₂	220	11	$0,713 \cdot 10^{-6}$	1,1	2,2	~ 1100	-	[47]
18.	Обработанный p-MoTe ₂	220	11	$\sim 12 \cdot 10^{-9}$	0,9	1,9	~ 1	-	[47]
19.	Пленка $\text{PtS}_x/\text{сапфир}$	532	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$0,162 \cdot 10^{-6}$	1,052	1,374	0,31	$9,17 \cdot 10^9$	[48]
20.	Хлопья PtS_2	500	3,107	$\sim 60 \cdot 10^{-9}$	0,46	0,46	$1,56 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^{11}$	[49]

Заключение

Разработанные фотодетекторы на основе чистых и функционализированных AgNO_3 листов TiS_2 демонстрируют воспроизводимые результаты фотодетекти-

рования. Характеристики изготовленного фотодетектора на основе $\text{TiS}_2\text{-AgNO}_3$ в виде чувствительности $((260 \pm 7) \cdot 10^3 \text{ А/Вт})$, квантовой эффективности $((303 \pm 8) \cdot 10^3 \text{ А/Вт}\cdot\text{нм})$ и обнаружительной способности $((3,10 \pm 0,09) \cdot 10^{13} \text{ Джонс})$ значительно лучше, чем

у фотодетектора на чистых листах TiS_2 . Кроме того, ряд характеристик данного фотодетектора превосходит аналогичные характеристики известных фотодетекторов на основе других халькогенидов переходных металлов.

Благодарности

Синтез наноматериалов и наноструктур, эксперименты по фотодетектированию, рамановская спектроскопия и анализ всех полученных в данной работе результатов выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00272, <https://rscf.ru/project/21-79-00272/>.

Исследования морфологии синтезированных наноструктур на наноуровне были проведены методом сканирующей электронной микроскопии при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР лаборатории «Фотоника для умного дома и умного города» (Государственный контракт с Самарским национальным исследовательским университетом имени академика С.П. Королева) (проект ФССС-2021-0016).

References

- [1] Abid, Sehrawat P, Islam SS, Gulati P, Talib M, Mishra P, Khanuja M. Development of highly sensitive optical sensor from carbon nanotube-alumina nanocomposite free-standing films: CNTs loading dependence sensor performance analysis. *Sens Actuator A Phys* 2018; 269: 62-69. DOI: 10.1016/j.sna.2017.10.062.
- [2] Segev-Bar M, Haick H. Flexible sensors based on nanoparticles. *ACS Nano* 2013; 7(10): 8366-8378. DOI: 10.1021/nn402728g.
- [3] Abid, Sehrawat P, Julien CM, Islam SS. WS_2 quantum dots on e-textile as a wearable UV photodetector: How well reduced graphene oxide can serve as a carrier transport medium? *ACS Appl Mater Interfaces* 2020; 12(35): 39730-39744. DOI: 10.1021/acsami.0c08028.
- [4] Colace L, Masini G, Galluzzi F, Assanto G, Capellini G, Gaspare LDI, Palange E, Evangelisti F. Metal-semiconductor-metal near-infrared light detector based on epitaxial Ge/Si. *Appl Phys Lett* 1998; 72(24): 3175-3177. DOI: 10.1063/1.121584.
- [5] Choi C, Choi MK, Liu S, Kim MS, Park OK, Im C, Kim J, Qin X, Lee GJ, Cho KW, Kim M, Joh E, Lee J, Son D, Kwon SH, Jeon NL, Song YM, Lu N, Kim DH. Human eye-inspired soft optoelectronic device using high-density MoS_2 -graphene curved image sensor array. *Nat Commun* 2017; 8: 1664. DOI: 10.1038/s41467-017-01824-6.
- [6] Chen S, Teng C, Zhang M, Li Y, Xie D, Shi G. A flexible UV-Vis-NIR photodetector based on a perovskite/conjugated-polymer composite. *Adv Mater* 2016; 28: 5969. DOI: 10.1002/adma.201600468.
- [7] Sun Z, Liu Z, Li J, Tai G, Lau SP, Yan F. Infrared photodetectors based on CVD-grown graphene and PbS quantum dots with ultrahigh responsivity. *Adv Mater* 2012; 24: 5878. DOI: 10.1002/adma.201202220.
- [8] Tao Y, Wu X, Wang W, Wang J. Flexible photodetector from ultraviolet to near infrared based on a SnS_2 nanosheet microsphere film. *J Mater Chem C* 2015; 6: 1347. DOI: 10.1039/C4TC02325K.
- [9] Sahatiya P, Puttapati SK, Srikanth VVSS, Badhulika S. Graphene-based wearable temperature sensor and infrared photodetector on a flexible polyimide substrate. *Flex Print Electron* 2016; 1(2): 025006. DOI: 10.1088/2058-8585/1/2/025006.
- [10] Chen G, Wang W, Wang C, Ding T, Yang Q. Controlled synthesis of ultrathin Sb_2Se_3 nanowires and application for flexible photodetectors. *Adv Sci* 2015; 2: 1500109. DOI: 10.1002/advs.201500109.
- [11] Chitara B, Panchakarla LS, Krupanidhi SB, Rao CNR. Infrared photodetectors based on reduced graphene oxide and graphene nanoribbons. *Adv Mater* 2011; 23: 5419-5424. DOI: 10.1002/adma.201101414.
- [12] Zheng Z, Zhang T, Yao J, Zhang Y, Xu J, Yang G. Flexible, transparent and ultra-broadband photodetector based on large-area WSe_2 film for wearable devices. *Nanotechnology* 2016; 27: 255501. DOI: 10.1088/0957-4484/27/22/225501.
- [13] Hao Q, Tang X, Cheng Y, Hu Y. Development of flexible and curved infrared detectors with HgTe colloidal quantum dots. *Infrared Phys Technol* 2020; 108: 103344. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103344.
- [14] Mak KF, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz TF. atomically thin MoS_2 : a new direct-gap semiconductor. *Phys Rev Lett* 2010; 105: 136805. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.136805.
- [15] Buscema M, Barkelid M, Zwiller V, Zant HSJ, Steele GA, Castellanos-Gomez A. Large and tunable photothermoelectric effect in single-layer MoS_2 . *Nano Lett* 2013; 13(2): 358-363. DOI: 10.1021/nl303321g.
- [16] Chang YH, Zhang W, Zhu Y, Han Y, Pu J, Chang JK, Hsu WT, Huang JK, Hsu CL, Chiu MH. Monolayer MoSe_2 grown by chemical vapor deposition for fast photodetection. *ACS Nano* 2014; 8(8): 8582-8590. DOI: 10.1021/nn503287m.
- [17] Perea-Lopez N, Elias AL, Berkdemir A, Castro-Beltran A, Gutierrez HR, Feng S, Lv R, Hayashi T, Lopez-Urrias F, Ghosh S, Muchharla B, Talapatra S, Terrones H, Terrones M. Photosensor device based on few-layered WS_2 films. *Adv Funct Mater* 2013; 23: 5511. DOI: 10.1002/adfm.201300760.
- [18] Groenendijk DJ, Buscema M, Steele GA, Michaelis de Vasconcellos S, Bratschitsch R, Zant HSJ, Castellanos-Gomez A. Photovoltaic and photothermoelectric effect in a double-gated WSe_2 device. *Nano Lett* 2014; 14(10): 5846-5852. DOI: 10.1021/nl502741k.
- [19] Liu F, Shimotani H, Shang H, Kanagasekaran T, Zólyomi V, Drummond N, Fal'ko VI, Tanigaki K. High-sensitivity photodetectors based on multilayer GaTe flakes. *ACS Nano* 2014; 8(1): 752-760. DOI: 10.1021/nn4054039.
- [20] Hu P, Wen Z, Wang L, Tan P, Xiao K. Synthesis of few-layer GaSe nanosheets for high performance photodetectors. *ACS Nano* 2012; 6(7): 5988-5994. DOI: 10.1021/nn300889c.
- [21] Hu P, Wang L, Yoon M, Zhang J, Feng W, Wang X, Wen Z, Idrobo JC, Miyamoto Y, Geohegan DB, Xiao K. Highly responsive ultrathin GaS nanosheet photodetectors on rigid and flexible substrates. *Nano Lett* 2013; 13(4): 1649-1654. DOI: 10.1021/nl400107k.
- [22] Jacobs-Gedrim RB, Shanmugam M, Jain N, Durcan CA, Murphy MT, Murray TM, Matyi RJ, Moore RL, Yu B. Extraordinary photoresponse in two-dimensional In_2Se_3 nanosheets. *ACS Nano* 2014; 8(1): 514-521. DOI: 10.1021/nn405037s.
- [23] Lei S, Ge L, Najmaei S, George A, Kappera R, Lou J, Chhowalla M, Yamaguchi H, Gupta G, Vajtai R. Evolution of the electronic band structure and efficient photo-

- detection in atomic layers of InSe. *ACS Nano* 2014; 8(2): 1263-1272. DOI: 10.1021/nn405036u.
- [24] Tripathi N, Pavelyev V, Sharma P, Kumar S, Rymzhina A, Mishra P. Review of titanium trisulfide (TiS₃): A novel material for next generation electronic and optical devices. *Mater Sci Semicond Process* 2021; 127: 105699. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105699.
- [25] Tao YR, Wu XC, Xiong WW. Flexible visible-light photodetectors with broad photoresponse based on ZrS₃ nanobelt films. *Small* 2014; 10: 4905. DOI: 10.1002/sml.201401376.
- [26] Schairer W, Shafer MW. Growth and optical absorption spectra of the layer-type trichalcogenides ZrS₃ and HfS₃. *Phys Status Solidi (a)* 1973; 17: 181. DOI: 10.1002/pssa.2210170119.
- [27] Buscema M, Groenendijk DJ, Steele GA, Zant HS, Castellanos-Gomez A. Photovoltaic effect in few-layer black phosphorus PN junctions defined by local electrostatic gating. *Nat Commun* 2014; 5: 4651. DOI: 10.1038/ncomms5651.
- [28] Buscema M, Island JO, Groenendijk DJ, Blanter SI, Steele GA, Zant HSJ, Castellanos-Gomez A. Photocurrent generation with two-dimensional van der Waals semiconductors. *Chem Soc Rev* 2015; 44: 3691. DOI: 10.1039/C5CS00106D.
- [29] Wan C, Kodama Y, Kondo M, Sasai R, Qian X, Gu X, Koga K, Yabuki K, Yang R, Koumoto K. Dielectric Mismatch mediates carrier mobility in organic-intercalated layered TiS₂. *Nano Lett* 2015; 15(10): 6302-6308. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01013.
- [30] Sherrell PC., Sharda K, Grotta C, Ranalli J, Sokolikova MS, Pesci FM, Palczynski P, Bemmer VL, Mattevi C. Thickness-dependent characterization of chemically exfoliated TiS₂ nanosheets. *ACS Omega* 2018; 3(8): 8655-8662. DOI: 10.1021/acs.omega.8b00766.
- [31] Glebko N, Aleksandrova I, Tewari GC, Tripathi TS, Karpinen M, Karttunen AJ. Electronic and vibrational properties of TiS₂, ZrS₂, and HfS₂: periodic trends studied by dispersion-corrected hybrid density functional methods. *J Phys Chem C* 2018; 122(47): 26835-26844. DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b08099.
- [32] Varma SJ, Kumar J, Liu Y, Layne K, Wu J, Liang C, Nakanishi Y, Aliyan A, Yang W, Ajayan PM., Thomas J. 2D TiS₂ layers: a superior nonlinear optical limiting material. *Adv Opt Mater* 2017; 5: 1700713. DOI: 10.1002/adom.201700713.
- [33] Talib M, Tripathi N, Sharma P, Hasan PMZ., Melaibari AA, Darwesh R, Arsenin AV, Volkov VS, Yakubovsky DI, Kumar S, Pavelyev V, Mishra P. Development of ultrasensitive broadband photodetector: a detailed study on hidden photodetection-properties of TiS₂ nanosheets. *J Mater Res Technol* 2021; 14: 1243-1254. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.032.
- [34] Pavelyev V, Sharma P, Rymzhina A, Mishra P, Tripathi N. Advances in transition metal dichalcogenides-based flexible photodetectors. *J Mater Sci Mater Electron* 2022; 33: 24397-24433. DOI: 10.1007/s10854-022-09204-7.
- [35] Talib M, Tabassum R, Abid, Islam SS, Mishra P. Improvements in the performance of a visible-NIR photodetector using horizontally aligned TiS₃ Nanoribbons. *ACS Omega* 2019; 4(4): 6180-6191. DOI: 10.1021/acs.omega.8b03067.
- [36] Frisenda R, Giovannelli E, Mishra P, Gant P, Flores E, Sánchez C, Ares JR, De Lara PD, Ferrer IJ, Pérez EM, Castellanos-Gomez A. Dielectrophoretic assembly of liquid-phase-exfoliated TiS₃ nanoribbons for photodetecting applications. *Chem Commun* 2017; 53(45): 6164-6167. DOI: 10.1039/c7cc01845b.
- [37] Zhang W, Huang J-K, Chen C-H, Chang Y-H, Cheng Y-J, Li L-J. High-gain phototransistors based on a CVD MoS₂ monolayer. *Adv Mater* 2013; 25(25): 3456-3461. DOI: 10.1002/adma.201301244.
- [38] Kwon J, Hong YK, Han G, Omkaram I, Choi W, Kim S, Yoon Y. Giant photoamplification in indirect-bandgap multilayer MoS₂ phototransistors with local bottom-gate structures. *Adv Mater* 2015; 27(13): 2224-2230. DOI: 10.1002/adma.201404367.
- [39] Choi W, Cho MY, Konar A, Lee JH, Cha GB, Hong SC, Kim S, Kim J, Jena D, Joo J, Kim S. High-detectivity multilayer MoS₂ phototransistors with spectral response from ultraviolet to infrared. *Adv Mater* 2012; 24(43): 5832-5836. DOI: 10.1002/adma.201201909.
- [40] Pak Y, Park W, Mitra S, Devi AAS, Loganathan K, Kumaresan Y, Kim Y, Cho B, Jung GY, Hussain MM, Roqan IS. Enhanced performance of MoS₂ photodetectors by inserting an ALD-processed TiO₂ interlayer. *Small* 2018; 14(5): 1703176. DOI: 10.1002/sml.201703176.
- [41] Wang X, Huang L, Peng Y, Huo N, Wu K, Xia C, Wei Z, Tongay S, Li J. Enhanced rectification, transport property and photocurrent generation of multilayer ReSe₂/MoS₂ p-n heterojunctions. *Nano Res* 2016; 9(2): 507-516. DOI: 10.1007/s12274-015-0932-6.
- [42] Zhou X, Zhou N, Li C, Song H, Zhang Q, Hu X, Gan L, Li H, Lü J, Luo J, Xiong J, Zhai T. Vertical heterostructures based on SnSe₂/MoS₂ for high performance photodetectors. *2D Materials* 2017; 4(2): 025048. DOI: 10.1088/2053-1583/aa6422.
- [43] Chen Y, Gan L, Li H, Ma Y, Zhai T. Achieving uniform monolayer transition metal dichalcogenides film on silicon wafer via silanization treatment: a typical study on WS₂. *Adv Mater* 2017; 29(7): 1603550. DOI: 10.1002/adma.201603550.
- [44] Kang X, Lan C, Li F, Wang W, Yip SP, Meng Y, Wang F, Lai Z, Liu C, Ho JC. Van der Waals PdSe₂/WS₂ heterostructures for robust high-performance broadband photodetection from visible to infrared optical communication band. *Adv Opt Mater* 2021; 9(7): 2001991. DOI: 10.1002/adom.202001991.
- [45] Li K, Du C, Gao H, Yin T, Zheng L, Leng J, Wang W. Ultrafast and polarization-sensitive ReS₂/ReSe₂ heterostructure photodetectors with ambipolar photoresponse. *ACS Appl Mater Interfaces* 2022; 14(29): 33589-33597. DOI: 10.1021/acsami.2c09674.
- [46] Hafeez M, Gan L, Li H, Ma Y, Zhai T. Chemical vapor deposition synthesis of ultrathin hexagonal ReSe₂ flakes for anisotropic Raman property and optoelectronic application. *Adv Mater* 2016; 28(37): 8296-8301. DOI: 10.1002/adma.201601977.
- [47] Ko BM, Khan MF, Dastgeer G, Han GN, Khan MA, Eom J. Reconfigurable carrier type and photodetection of MoTe₂ of various thicknesses by deep ultraviolet light illumination. *Nanoscale Adv* 2022; 4: 2744-2751. DOI: 10.1039/D1NA00881A.
- [48] Wang Y, Zhang Y, Cheng Q, Pang J, Chu Y, Ji H, Gao J, Han Y, Han L, Liu H, Zhang Y. Large area uniform PtS_x synthesis on sapphire substrate for performance improved photodetectors. *Appl Mater Today* 2021; 25: 101176. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101176.
- [49] Li L, Wang W, Chai Y, Li H, Tian M, Zhai T. Few-layered PtS₂ phototransistor on h-BN with high gain. *Adv Funct Mater* 2017; 27(27): 1701011. DOI: 10.1002/adfm.201701011.

Сведения об авторах

Рымжина Анастасия Романовна, аспирант кафедры наноинженерии Самарского университета по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики». Область научных интересов: материаловедение, фотоэлектрические устройства, наноструктуры, наноматериалы, фотодетекторы, фотокатализ. E-mail: rymzhina.ar@ssau.ru

Шарма Прачи, Ph.D., доцент кафедры наноинженерии Самарского университета, доцент школы электронной инженерии (SENSE) технологического института Веллора (VIT). Область научных интересов: наноструктуры, наноматериалы, тонкопленочные транзисторы, фотодетекторы, фотокатализ. E-mail: er.prachi22@gmail.com

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и старший преподаватель кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipnovvv@ya.ru

Артемьев Дмитрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерных и биотехнических систем, старший научный сотрудник НИЛ-96 «Фотоника» Самарского университета. Область научных интересов: спектроскопия, Рамановская спектроскопия, биофотоника, проектирование оптических приборов, волоконная оптика, оптоволоконные зонды. E-mail: artemyevdn@ssau.ru

Тукмаков Константин Николаевич, ведущий инженер кафедры наноинженерии Самарского университета. Область научных интересов: технологии наноэлектроники и микросистемной техники. E-mail: tukmakov.k@gmail.com

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт». Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: nano@ssau.ru

Платонов Владимир Игоревич, кандидат химических наук, доцент кафедры химии Самарского университета и старший научный сотрудник НИЛ-35. Область научных интересов: газовая хроматография, микрофлюидика, детекторы, материаловедение, планарные технологии, микроэлектромеханические системы. E-mail: rovvv@yandex.ru

Мишра Прабхаш, Ph.D., доцент кафедры наноинженерии Самарского университета, доцент университета Джамия Миллия Исламия. Область научных интересов: наноструктуры, наноматериалы, фотодетекторы, фотокатализ, газоанализ. E-mail: prabhash786@gmail.com

Трипати Нишант, Ph.D., доцент кафедры наноинженерии Самарского университета. Область научных интересов: наноструктуры, наноматериалы, фотодетекторы, фотокатализ, газоанализ. E-mail: nishant.tripathi.11@gmail.com

ГРНТИ: 29.31.15, 29.31.27

Поступила в редакцию 27 апреля 2023 г. Окончательный вариант – 30 октября 2023 г.

Ultra-fast highly sensitive flexible infrared detector

A.R. Rymzhina¹, P. Sharma^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,3}, D.N. Artemyev¹, K.N. Tukmakov¹, V.S. Pavelyev^{1,3}, V.I. Platonov¹,
P. Mishra^{1,4}, N. Tripathi¹

¹ Samara National Research University,

443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

² School of Electronics Engineering (SENSE), Vellore Institute of Technology (VIT),
632014, Vellore, Tamil Nadu, India;

³ Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute",
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151;

⁴ Centre for Nanoscience and Nanotechnology, Jamia Millia Islamia (A Central University),
110025, Jamia Nagar, New Delhi, India

Abstract

A comparative analysis of photodetectors based on TiS₂ nanosheets and on TiS₂ nanosheets functionalized with silver nitrate is carried out. TiS₂ nanosheets were synthesized by a chemical vapor transport technique, followed by a 1-hour ultrasonication treatment. The obtained solution was deposited between interdigitated electrodes fabricated on the surface of a flexible substrate using a dielectrophoresis process. Polyethylene terephthalate was used as a flexible substrate material. The characteristics of the fabricated photodetectors were determined by illuminating them with tunable-power laser light at 1064 nm. A significant effect of silver nitrate particles scattered in the volume of the photodetector sensitive material on its efficiency is observed. The superiority of the photodetector based on TiS₂ nanosheets functionalized with silver nitrate is demonstrated. This photodetector demonstrates a significant response for all the laser light powers used (11.6, 19.6, 51, 100, and 150 mW), shows fast response (0.23 ± 0.01 s) and recovery (0.49 ± 0.02 s) times, coupled with high sensitivity ($260 \cdot 10^3 \pm 7 \cdot 10^3$ A/W), quantum efficiency ($303 \cdot 10^3 \pm 8 \cdot 10^3$ A/W·nm) and detectivity ($3.10 \cdot 10^{13} \pm 0.09 \cdot 10^{13}$ Jones) at an incident laser light power of 11.6 mW. The results obtained in this study can be used for the development and optimization of modern optoelectronic devices.

Keywords: flexible photodetector, transition metal dichalcogenides, TiS₂ nanosheets, infrared radiation, dielectrophoresis, chemical vapor transport.

Citation: Rymzhina AR, Sharma P, Podlipnov VV, Artemyev DN, Tukmakov KN, Pavelyev VS, Platonov V, Mishra P, Tripathi N. Ultra-fast highly sensitive flexible infrared detector. *Computer Optics* 2024; 48(3): 363-370. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1325.

Acknowledgements: This work was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 21-79-00272, <https://rscf.ru/project/21-79-00272/>.

Authors' information

Anastasia Romanovna Rymzhina, post-graduate student of Nanoengineering department of Samara National Research University, specialty 1.3.2. "Instruments and methods of experimental physics". Research interests: materials science, photoelectric devices, nanostructures, nanomaterials, photodetectors, photocatalysis.
E-mail: rymzhina.ar@ssau.ru

Prachi Sharma, Ph.D., Associate Professor of Nanoengineering department of Samara National Research University, Associate Professor at the School of Electronics Engineering (SENSE) at the Vellore Institute of Technology (VIT). Research interests: nanostructures, nanomaterials, thin-film transistors, photodetectors, photocatalysis.
E-mail: er.prachi22@gmail.com

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru

Dmitry Nikolaevich Artemyev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Laser and Biotechnical Systems Department, Senior Researcher at scientific laboratory "Photonics" of Samara University. Re-

search interests: spectroscopy, Raman spectroscopy, biophotonics, optical systems design, fiber optics, fiber optic probes. E-mail: artemyevdn@ssau.ru

Konstantin Nikolaevich Tukmakov, a leading engineer of Nanoengineering department of Samara National Research University. Research interests: technologies of nanoelectronics and microsystem technique. E-mail: tukmakov.k@gmail.com

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of Samara National Research University, chief researcher of the Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute". Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: nano@ssau.ru

Vladimir Igorevich Platonov, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Chemistry department of Samara National Research University, senior scientist at Samara National Research University's Lab-35. Research interests: gas chromatography, microfluidics, detectors, materials science, planar technologies, microelectromechanical systems. E-mail: rovvv@yandex.ru

Prabhash Mishra, Ph.D., Associate Professor of Nanoengineering department of Samara National Research University, Associate Professor at the Jamia Millia Islamia (A Central University). Research interests: nanostructures, nanomaterials, photodetectors, photocatalysis, gas analysis. E-mail: prabhash786@gmail.com

Nishant Tripathi, Ph.D., Associate Professor of Nanoengineering department of Samara National Research University. Research interests: nanostructures, nanomaterials, photodetectors, photocatalysis, gas analysis. E-mail: nishant.tripathi.11@gmail.com

Received April 27, 2023. The final version – October 30, 2023.
