

УДК 681.586:620.3

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ВОЛОКОННЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА ( $\text{MoS}_2$ )

Теслёнок А.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь

Горячун Н.В. – старший преподаватель

**Аннотация.** Развитие волоконных сенсорных технологий на основе двумерных наноматериалов открывает революционные перспективы создания искусственных систем восприятия, имитирующих функции органов чувств человека. Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) и другие двумерные материалы демонстрируют уникальные электронные, оптические и механические свойства, позволяющие конструировать многофункциональные датчики нового поколения. В статье рассматриваются физические принципы работы волоконных сенсоров на основе дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ , их структурные особенности и механизмы преобразования физических воздействий в электрические сигналы. Вместе с тем уделяется внимание перспективам применения «умных волокон» в робототехнике, медицине и носимой электронике.

**Ключевые слова:** Двумерные материалы, дисульфид молибдена, волоконные датчики, многофункциональные сенсоры, наноматериалы, искусственные органы чувств.

**Введение.** Двумерные материалы, толщина которых составляет всего несколько атомных слоёв, обладают экстремально высоким соотношением площади поверхности к объёму. Это обстоятельство делает их исключительно чувствительными к внешним воздействиям. Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), состоящий из чередующихся слоёв атомов молибдена и серы, проявляет полупроводниковые свойства с шириной запрещённой зоны около 1,8 эВ [1] для монослоя (рисунок 1):

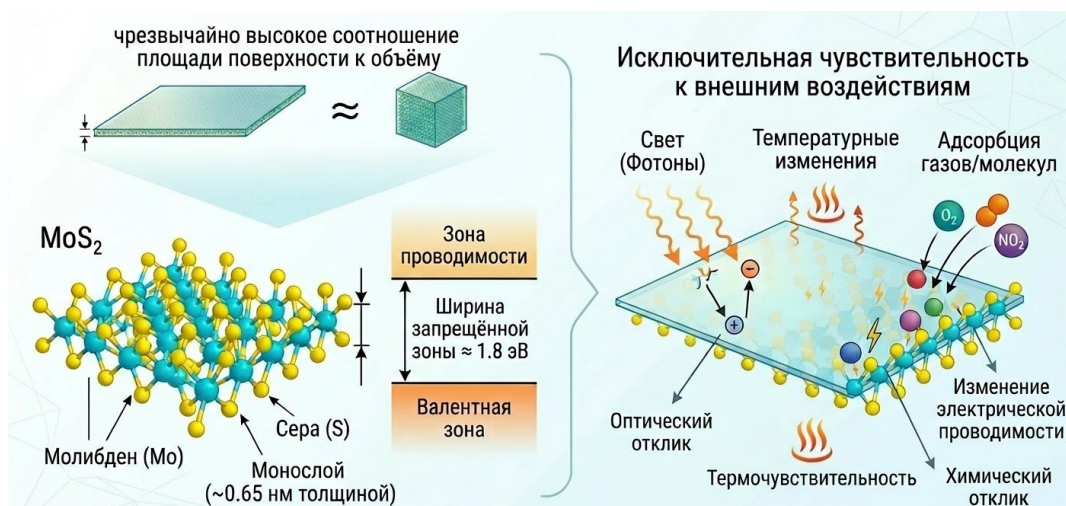


Рисунок 1 – Схема свойств и чувствительности атомарных слоёв Дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ )

Данная характеристика принципиально отличает дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) от графена, не имеющего запрещённой зоны, что предоставляет дополнительные возможности для создания транзисторов и фотодетекторов.

Интеграция двумерных материалов в волоконные структуры позволяет создавать датчики, совмещающие высокую чувствительность с механической гибкостью, растяжимостью и малым весом. Такие системы способны работать в изогнутом состоянии, выдерживать многократные деформации и органично встраиваться в текстильные изделия. Актуальность развития подобных технологий обусловлена растущей потребностью в сенсорах для робототехники, медицинского мониторинга, «умной» одежды и промышленных систем контроля.

**Основная часть.** Уникальные сенсорные свойства дисульфида молибдена определяются его электронной структурой и особенностями межслоевого взаимодействия. В объёмном состоянии  $\text{MoS}_2$  представляет собой непрямозонный полупроводник, однако при переходе к монослойной структуре происходит трансформация в прямозонный полупроводник с шириной запрещённой зоны 1,8-1,9 эВ. Это квантовомеханическое явление, обусловленное изменением симметрии кристаллической решётки, радикально влияет на оптические и электронные свойства материала.

Механизм тактильной чувствительности волоконных датчиков на основе  $\text{MoS}_2$  реализуется через пьезорезистивный эффект [4] — изменение электрического сопротивления материала под действием механической деформации. При растяжении или сжатии волокна происходит изменение межатомных расстояний в кристаллической решётке  $\text{MoS}_2$ , что модифицирует структуру энергетических зон и подвижность носителей заряда. Экспериментальные исследования демонстрируют, что чувствительность таких датчиков может достигать значений *gauge factor* (коэффициент чувствительности тензорезистора) свыше 100, что превосходит характеристики традиционных металлических тензорезисторов на порядок величины.

Температурная чувствительность  $\text{MoS}_2$ -датчиков основана на термически активируемой проводимости полупроводника. С повышением температуры возрастает концентрация термически генерированных носителей заряда, что приводит к закономерному снижению электрического сопротивления материала. Температурный коэффициент сопротивления [2] дисульфида молибдена составляет величину порядка  $-0,5\%$  на градус Цельсия, обеспечивая точность температурных измерений до десятых долей градуса. Данная характеристика позволяет использовать волоконные датчики для медицинского мониторинга температуры тела с высокой пространственной разрешающей способностью.

Химическая чувствительность двумерных материалов обусловлена адсорбцией молекул газов на поверхности кристаллической решётки.

Российские исследователи из Московского физико-технического института [3] продемонстрировали возможность детектирования концентраций аммиака [2] на уровне единиц ppb (англ. parts per billion, частей на миллиард) с использованием транзисторных структур на основе  $\text{MoS}_2$ . Такая чувствительность открывает перспективы создания портативных анализаторов для медицинской диагностики по составу выдыхаемого воздуха, экологического мониторинга и контроля промышленных процессов.

Оптические свойства  $\text{MoS}_2$  также находят применение в волоконных сенсорных системах. Прямоzonная структура монослоя обеспечивает эффективное поглощение и излучение света в видимом диапазоне с максимумами около 660 нм (красный свет) и 610 нм. Интеграция  $\text{MoS}_2$  в волоконные световоды позволяет создавать комбинированные оптоэлектронные датчики, регистрирующие как механические деформации, так и изменения интенсивности светового потока.

Исследователи из РТУ МИРЭА [5] разработали фотодетекторы на основе полупроводниковых плёнок из дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) с высокой концентрацией дефектов. Подобные дефекты повышают чувствительность сенсоров к световому излучению, но значительно снижают скорость реагирования. Решением данной проблемы стали асимметричные плазмонные решётки. Они усилили поглощения света и добавили возможность различать поляризацию. Устройства демонстрируют впечатляющие характеристики: фотоотклик около 60 мА/Вт и чувствительность к поляризации света до 80%. Исследователи смогли объединить в одном устройстве высокую чувствительность, способность различать поляризацию и быстрое время реакции, что делает данные фотодетекторы перспективными для широкого спектра применений.

Принципиальным преимуществом двумерных материалов является возможность создания гетероструктур — многослойных композиций из различных двумерных материалов с комплементарными свойствами. Сочетание  $\text{MoS}_2$  с графеном, гексагональным нитридом бора или другими дихалькогенидами переходных металлов позволяет конструировать сенсоры с программируемыми характеристиками и расширенным функционалом.

Двумерные дихалькогениды переходных металлов, в частности, сульфида молибдена  $\text{MoS}_2$ , представляют собой особый класс слоистых материалов, в которых соседние слои связаны слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Это тонкие полупроводники, состоящие из переходного металла и халькогена. Один слой атомов металла располагается между двумя слоями атомов халькогена, в нашем случае халькоген — сера.

Критически важным аспектом практического применения является обеспечение стабильных электрических контактов к сенсорному элементу. Традиционные металлические электроды могут создавать механические напряжения в зоне контакта при деформациях волокна, приводя к деградации характеристик. Решением проблемы является использование проводящих полимерных композитов или жидкометаллических сплавов на основе галлия, сохраняющих проводимость при значительных деформациях.

Многофункциональность волоконных сенсорных систем достигается за счёт интеграции нескольких типов чувствительных элементов в единую структуру. Например, сочетание  $\text{MoS}_2$ -датчика деформации с терморезистивным элементом на основе углеродных нанотрубок и химического сенсора на базе проводящего полимера позволяет создать волокно, одновременно регистрирующее механические, температурные и химические воздействия. Селективность отклика обеспечивается применением методов машинного обучения для анализа многомерных сенсорных данных.

Перспективные направления фундаментальных исследований включают изучение квантовых эффектов в сверхтонких структурах  $\text{MoS}_2$ , разработку гетероструктур с программируемыми свойствами и создание биогибридных систем, сочетающих синтетические двумерные материалы с биологическими рецепторами.

Волоконные датчики на основе  $\text{MoS}_2$  и других двумерных материалов представляют собой не просто усовершенствование существующих сенсорных технологий, а качественно новый класс устройств, открывающих путь к созданию многофункциональных искусственных систем восприятия. Ближайшие перспективы развития направления связаны с несколькими ключевыми областями применения.

В робототехнике «умные волокна» позволяют создавать искусственную кожу нового поколения, наделяющую роботов тактильной чувствительностью, необходимой для манипулирования хрупкими объектами и безопасного взаимодействия с людьми. Российские разработчики из Сколковского института науки и технологий создали прототип роботизированного захвата с волоконными  $\text{MoS}_2$ -датчиками, способного различать объекты по текстуре поверхности и температуре с точностью, приближающейся к человеческой. Такие системы критически важны для развития коллаборативной робототехники и автоматизации сложных сборочных операций.

Медицинские применения включают непрерывный мониторинг физиологических параметров пациентов, раннюю диагностику патологических состояний и контроль эффективности терапии. Волоконные датчики могут интегрироваться в биндажи, ортезы, хирургические шовные материалы, обеспечивая информацию о заживлении тканей, воспалительных процессах и механических нагрузках. Биосовместимость дисульфида молибдена, подтверждённая рядом исследований, создаёт предпосылки для разработки имплантируемых сенсорных систем длительного действия.

Промышленный мониторинг и обеспечение безопасности работников представляют ещё одну важную сферу применения. Интеллектуальная рабочая одежда, оснащённая волоконными датчиками, способна регистрировать опасные уровни механической нагрузки, температуры, вибрации и токсичных газов, своевременно предупреждая о рисках травматизма и профессиональных заболеваний. Экономический эффект от внедрения таких систем складывается из снижения производственного травматизма, повышения производительности труда и оптимизации технологических режимов.

Несмотря на впечатляющие успехи, ряд фундаментальных и прикладных проблем требует решения для широкомасштабного внедрения технологии. К числу основных вызовов относятся:

- обеспечение долговременной стабильности характеристик при воздействии влаги, кислорода и ультрафиолетового излучения;
- стандартизация методов производства и метрологического контроля волоконных датчиков;
- снижение себестоимости производства до уровня, конкурентоспособного с традиционными сенсорными технологиями;
- разработка эффективных методов обработки больших объёмов сенсорных данных в реальном времени;
- обеспечение кибербезопасности распределённых сенсорных сетей.

Перспективные направления фундаментальных исследований включают изучение квантовых эффектов в сверхтонких структурах  $\text{MoS}_2$ , разработку гетероструктур с программируемыми свойствами и создание биогибридных систем, сочетающих синтетические двумерные материалы с биологическими рецепторами.

**Заключение.** Волоконные датчики на основе дисульфида молибдена и других двумерных материалов представляют собой прорывную технологию, обеспечивающую создание многофункциональных сенсорных систем с характеристиками, недостижимыми для традиционных решений. Уникальное сочетание высокой чувствительности, механической гибкости, миниатюрности и энергоэффективности открывает широчайшие перспективы применения «умных волокон» в робототехнике, медицине, носимой электронике и промышленном мониторинге.

Физические принципы функционирования  $\text{MoS}_2$ -датчиков базируются на фундаментальных свойствах двумерных полупроводниковых структур — зависимости электронной структуры от механических деформаций, температуры и молекулярной адсорбции. Понимание этих механизмов позволило разработать различные архитектурные решения: от поверхностных покрытий до объёмных композитов, оптимизированные для конкретных применений.

#### Список использованных источников:

1. Электрические и оптоэлектронные свойства наноразмерных вертикальных наноллистов, изготовленных из дисульфида молибдена / С.Е. Александров, Ю. Хаттаб // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 24–32.
2. Газовый сенсор на основе композита  $\text{MoS}_2$  / Шишин А.А. и др. // Химия твердого топлива, 2025. – №3. – С. 31–37.
3. Физики МФТИ разработали пленки  $\text{MoS}_2$  [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/news/806559/>– 2024 – Дата доступа: 26.02.2026.
4. Piezoresistivity in layered transition metal dichalcogenides / S. Manzeli, A. Allain, A. Ghadimi, A. Kis // Nature Communications, 2016. – Vol. 7, art. no. 10672. – URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms10672> – Дата доступа: 5.03.2026.
5. Гибкие сенсоры света на основе дисульфида молибдена / С.А. Лавров [и др.] // Optical Materials, 2025 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346724006359> – Дата доступа: 11.03.2026.

UDC 681.586:620.3

## PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF FIBER SENSORS BASED ON MOLYBDENUM DISULFIDE ( $\text{MOS}_2$ )

*Teslyonok A.V., student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Minsk, Republic of Belarus*

*Goryachun N.V. – senior lecturer*

**Annotation.** The development of fiber-based sensor technologies based on two-dimensional nanomaterials opens up revolutionary prospects for creating artificial perception systems that mimic the functions of human sensory organs. Molybdenum disulfide ( $\text{MOS}_2$ ) and other two-dimensional materials exhibit unique electronic, optical, and mechanical properties that enable the design of next-generation multifunctional sensors. The article discusses the physical principles of operation of fiber sensors based on  $\text{MOS}_2$ , their structural features and mechanisms for converting physical effects into electrical signals. At the same time, attention is being paid to the prospects of using smart fibers in robotics, medicine, and wearable electronics.

**Keywords:** Two-dimensional materials, molybdenum disulfide, fiber sensors, multifunctional sensors, nanomaterials, artificial sensory organs