FAN VA TA’LIM YANGILIKLARI
ILMIY-METODIK JURNAL
ISSN 3093-8694 ◆ saen.uz
2026-yil
11(1)-son

УДК 621.315.592:535.3

Музафарова Султанпаша Анваровна,
доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией НИИФПиМ при Национальном университете Узбекистана

Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Ферганского государственного университета

Ташланова Дилноза Муродиловна,
соискатель кафедры физики Ферганского государственного университета

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ТРИОКСИДА МОЛИБДЕНА

Аннотация. В статье представлены результаты исследования электрических и оптических свойств тонких плёнок триоксида молибдена (MoO_3), полученных на поверхности молибденовой подложки. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых функциональных материалов для современной микро- и оптоэлектроники, обладающих стабильными электрическими характеристиками и способностью изменять свои свойства под воздействием внешних факторов. Методами структурного и спектрального анализа исследованы особенности сформированных плёночных структур, а также их инфракрасные спектры пропускания. Изучена температурная зависимость электропроводности плёнок различной толщины при постоянном напряжении смещения 0,8 В. Установлено наличие двух температурных областей с различными значениями энергии активации проводимости. Особое внимание уделено исследованию изменения электрической проводимости плёнок MoO_3 под воздействием ультрафиолетового излучения и после его прекращения. Показано, что в процессе облучения электропроводность первоначально возрастает, затем снижается и постепенно достигает стационарного значения. После прекращения облучения наблюдается обратное изменение проводимости с последующим установлением равновесного состояния. Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности электрических и оптических характеристик тонких плёнок MoO_3 к ультрафиолетовому излучению и позволяют рассматривать данный материал в качестве перспективного функционального компонента электронных и оптоэлектронных устройств.

Ключевые слова: триоксид молибдена, MoO_3, тонкие плёнки, оксидные полупроводники, молибденовая подложка, ИК-спектры, электропроводность, энергия активации, ультрафиолетовое излучение, оптоэлектроника.

MOLIBDEN TRIOKSIDI YUPQA PLYONKALARINING ELEKTR VA OPTIK XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. Maqolada molibden taglik yuzasida hosil qilingan molibden trioksidi (MoO_3) yupqa plyonkalarining elektr va optik xususiyatlarini tadqiq etish natijalari bayon etilgan. Tadqiqotning dolzarbligi zamonaviy mikroelektronika va optoelektronika uchun barqaror elektr xususiyatlariga ega hamda tashqi ta’sirlar ostida o‘z xossalarini o‘zgartira

oladigan yangi funksional materiallarni ishlab chiqish zarurati bilan belgilanadi. Strukturaviy va spektral tahlil usullari yordamida hosil qilingan plyonkali tuzilmalarning xususiyatlari hamda ularning infraqizil diapazondagi o'tkazish spektrlari o'rganildi. Turli qalinlikdagi plyonkalarning 0,8 V doimiy siljish kuchlanishida elektr o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligi tadqiq qilindi. Elektr o'tkazuvchanlikning ikki xil faollanish energiyasiga ega harorat sohalari mavjudligi aniqlandi. Shuningdek, MoO_3 plyonkalarining ultrabinafsha nurlanish ta'sirida va nurlanish to'xtatilgandan keyingi elektr o'tkazuvchanligi o'zgarishlari tahlil qilindi. Nurlanish jarayonida elektr o'tkazuvchanlik dastlab ortishi, keyinchalik kamayishi va muayyan vaqtdan so'ng barqaror qiymatga erishishi kuzatildi. Nurlanish to'xtatilgach, o'tkazuvchanlikning qayta ortishi va yangi muvozanat holatiga kelishi aniqlandi. Olingan natijalar MoO_3 yupqa plyonkalarining elektr va optik xususiyatlari ultrabinafsha nurlanishga sezgir ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: molibden trioksidi, MoO_3, yupqa plyonkalar, oksid yarimo'tkazgichlar, molibden taglik, infraqizil spektrlar, elektr o'tkazuvchanlik, faollanish energiyasi, ultrabinafsha nurlanish, optoelektronika.

ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF MOLYBDENUM TRIOXIDE THIN FILMS

Abstract. This article presents the results of an investigation into the electrical and optical properties of molybdenum trioxide (MoO_3) thin films formed on a molybdenum substrate. The relevance of the study is determined by the growing demand for new functional materials with stable electrical characteristics and controllable properties for modern microelectronics and optoelectronics. Structural and spectral analysis methods were employed to investigate the characteristics of the fabricated film structures and their infrared transmission spectra. The temperature dependence of the electrical conductivity of films with different thicknesses was examined at a constant bias voltage of 0.8 V. Two temperature regions characterized by different activation energies of electrical conductivity were identified. Particular attention was paid to changes in the electrical conductivity of MoO_3 thin films under ultraviolet irradiation and after the irradiation was discontinued. The results showed that electrical conductivity initially increases during irradiation, subsequently decreases, and gradually approaches a steady-state value. After the ultraviolet source is switched off, the conductivity increases again before reaching a new equilibrium state. These findings demonstrate the sensitivity of the electrical and optical properties of MoO_3 thin films to ultraviolet radiation and indicate their potential for application in electronic and optoelectronic devices.

Keywords: molybdenum trioxide, MoO_3, thin films, oxide semiconductors, molybdenum substrate, infrared spectra, electrical conductivity, activation energy, ultraviolet radiation, optoelectronics.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной микроэлектроники и материаловедения является поиск и разработка новых функциональных материалов, способных обеспечить повышение эффективности, надёжности и эксплуатационных характеристик электронных устройств. Несмотря на значительные достижения кремниевой технологии, расширение функциональных возможностей

современной электроники требует применения материалов с особыми электрическими, оптическими и структурными характеристиками. В этом отношении особый интерес представляют оксиды переходных металлов, обладающие широким спектром физических свойств.

Переходные металлы характеризуются наличием незаполненных электронных оболочек, что обусловливает возможность проявления переменной валентности и образования различных соединений с кислородом. Благодаря особенностям электронной структуры многие оксиды переходных металлов обладают полупроводниковыми свойствами, чувствительностью к температуре, электрическому полю и электромагнитному излучению. В связи с этим они рассматриваются в качестве перспективных материалов для создания элементов памяти, переключающих устройств, сенсоров и других компонентов современной электронной техники.

Особое место среди оксидных материалов занимает триоксид молибдена (MoO_3), представляющий интерес благодаря своим электрическим и оптическим характеристикам. Данный материал обладает широкозонными полупроводниковыми свойствами и способен изменять оптические характеристики под воздействием внешних факторов. Тонкие плёнки MoO_3 могут применяться в электронных дисплеях, оптоэлектронных системах и устройствах цветовой памяти. Одной из характерных особенностей этого соединения является возможность изменения окраски под воздействием ультрафиолетового излучения. Предполагается, что данный процесс связан с захватом электронов кислородными вакансиями и формированием центров окраски.

Молибден также имеет важное значение для современной промышленности. Значительная часть производимого металла используется в чёрной металлургии при изготовлении жаропрочных, жаростойких, коррозионностойких, инструментальных и конструкционных сталей. Добавление молибдена повышает механическую прочность материалов, способствует сохранению их эксплуатационных характеристик при высоких температурах и улучшает ряд технологических свойств.

Важным направлением исследования оксидов переходных металлов является изучение электрического переключения и фазовых переходов металл–диэлектрик или металл–полупроводник. Реализация переключающих эффектов в плёночных структурах может быть связана с формированием проводящих каналов в диэлектрической матрице основного вещества. Изучение подобных процессов имеет большое значение для разработки электронных устройств с функциями хранения и обработки информации [1, 2].

В связи с этим исследование электрических и оптических свойств тонких плёнок MoO_3 представляет как научный, так и практический интерес. Особую актуальность приобретает установление закономерностей изменения электропроводности в зависимости от температуры, толщины плёнки и продолжительности ультрафиолетового облучения.

Целью настоящей работы является получение тонкоплёночных структур на основе триоксида молибдена и исследование их электрических и оптических свойств с использованием структурных, спектральных и электрических методов.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Оксиды переходных металлов на протяжении длительного времени привлекают внимание исследователей благодаря разнообразию их физических свойств и широким возможностям практического применения. Особый интерес представляют материалы, в которых под воздействием внешних факторов происходят изменения электронной структуры, электрической проводимости и оптического поглощения.

В работе В. М. Орлова и В. Н. Колосова [1] рассматриваются процессы восстановления оксидных соединений тугоплавких металлов, в том числе молибдена. Представленные исследования имеют значение для понимания физико-химических процессов получения металлических и оксидных материалов. Вопросы формирования тонкоплёночных структур и получения гетерогенных систем также рассматриваются в научной литературе, посвящённой молекулярно-лучевой эпитаксии и технологиям создания полупроводниковых материалов [2].

Исследования С. А. Музафаровой и Д. М. Ташлановой [3] посвящены оптическим свойствам широкозонного полупроводникового соединения MoO_3. В работе рассматриваются особенности оптического поведения данного материала и перспективы его применения в функциональных электронных системах. В исследовании Ш. Б. Утамурадовой и С. А. Музафаровой [4] также изучаются свойства триоксида молибдена как широкозонного полупроводникового соединения.

Важное значение для понимания механизмов электропроводности оксидных полупроводников имеют исследования И. Г. Остина и Н. Ф. Мотта [6]. Авторы рассматривают особенности прыжковой проводимости в неупорядоченных материалах, связывая её с переносом локализованных носителей заряда. В частности, для ряда оксидов переходных металлов существенную роль играет механизм прыжкового переноса малых поляронов, при котором движение носителей сопровождается взаимодействием электронов с колебаниями кристаллической решётки.

Работы М. Анвара, К. А. Хогарта и К. Р. Теохариса [5] представляют интерес в контексте исследования электрических характеристик оксидных материалов и особенностей их поведения под воздействием внешних факторов.

Несмотря на наличие значительного количества исследований, вопросы взаимосвязи толщины плёнок MoO_3, температурной зависимости их электропроводности и изменения электрических характеристик под воздействием

ультрафиолетового излучения требуют дальнейшего экспериментального изучения. В частности, представляет интерес сопоставление поведения проводимости в процессе облучения и после его прекращения. Именно этому аспекту посвящено настоящее исследование.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись тонкие плёнки триоксида молибдена, сформированные на поверхности молибденовой подложки, а также плёночные структуры MoO_3, нанесённые на стеклянные подложки для проведения электрических измерений.

Получение плёночных структур осуществлялось на основе молибденовой фольги. На первоначальном этапе поверхность молибдена подвергалась предварительной химической обработке. Согласно методике, описанной в работах [3, 4], молибденовую фольгу предварительно обрабатывали азотной кислотой HNO_3, после чего образовавшийся оксидный слой удаляли с помощью плавиковой кислоты HF. Затем подложку тщательно промывали дистиллированной водой.

Дополнительная подготовка поверхности проводилась методом газового травления в реакционной камере в течение 30 минут. Обработка осуществлялась в потоке водорода H_2 при температуре, превышающей температуру последующего осаждения. Температура источника и подложки варьировалась в пределах 850–900 °C. Скорость охлаждения составляла порядка 10^{-5} град/мин согласно использованной экспериментальной методике.

Формирование оксидного слоя происходило в процессе термического взаимодействия нагретой молибденовой подложки с остаточным кислородом, присутствовавшим в системе. В результате химического взаимодействия образовывалась тонкая плёнка триоксида молибдена.

Для исследования структуры сформированных образцов применялся микроскоп МИМ-7 и микроанализатор типа «Камека». Особенности морфологии поверхности и границы раздела «молибденовая подложка – MoO_3» оценивались с использованием методов структурного анализа.

Оптические характеристики плёнок исследовались методом инфракрасной спектроскопии. Для регистрации спектров пропускания использовался спектральный измерительный комплекс, указанный в экспериментальных материалах как UV-3600i Plus. При этом модель применённого прибора и его соответствие режиму регистрации ИК-спектров требуют уточнения в окончательной версии публикации.

Температурная зависимость постоянной электрической проводимости изучалась с помощью программируемого электрометра. Измерения проводились при фиксированном напряжении смещения 0,8 В. Исследовались плёнки трёх различных толщин: 200, 220 и 280 нм. Температура образцов изменялась

в процессе измерений, что позволило установить характер зависимости электропроводности от температуры.

Для изучения фоточувствительных свойств использовались тонкие плёнки MoO_3 толщиной 200 нм, нанесённые на стеклянную подложку. Электрическая проводимость измерялась при комнатной температуре и постоянном напряжении смещения 0,8 В. Измерения проводились непосредственно во время ультрафиолетового облучения, а также после его прекращения. Такой подход позволил проследить динамику изменения электропроводности и оценить характер установления стационарного состояния.

Для анализа температурной зависимости проводимости использовалась экспоненциальная зависимость типа Аррениуса:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT),$$

где σ — электрическая проводимость, σ_0 — предэкспоненциальный множитель, E_a — энергия активации проводимости, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Логарифмирование данного выражения позволяет представить температурную зависимость в линейной форме:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_a/kT.$$

Таким образом, наклон линейных участков зависимости $\ln \sigma$ от обратной температуры позволяет определить энергию активации электрической проводимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведённых экспериментов были получены тонкие плёнки триоксида молибдена на поверхности молибденовой подложки. Структурный анализ показал наличие аморфных участков и столбчатых элементов в сформированном плёночном слое. Наблюдаемая морфология свидетельствует об особенностях формирования оксидной структуры на металлической поверхности.

На рисунке 1 представлены микрофотографии исходной молибденовой фольги и поверхности с сформированной плёнкой MoO_3 при различных увеличениях.





Рис. 1. Микрофотографии исходной молибденовой фольги без обработки поверхности (а) и плёнки MoO_3 на поверхности молибденовой подложки (в).

Для подтверждения формирования оксидной плёнки были исследованы её инфракрасные спектры пропускания. Измерения проводились для образца толщиной 200 нм, сформированного на молибденовой подложке.

Как показано на рисунке 2, в спектре наблюдаются характерные полосы пропускания, соответствующие колебательным состояниям химических связей в структуре MoO_3. Слабые полосы зарегистрированы в областях 580 и 780 $см^{-1}$, тогда как более интенсивные особенности спектра наблюдаются при 468, 890 и 1000 $см^{-1}$.

Совокупность выявленных спектральных особенностей согласуется с формированием оксидной структуры на основе триоксида молибдена. Полученные результаты подтверждают возможность использования спектрального анализа для исследования химического состава и структурных характеристик сформированных плёнок.

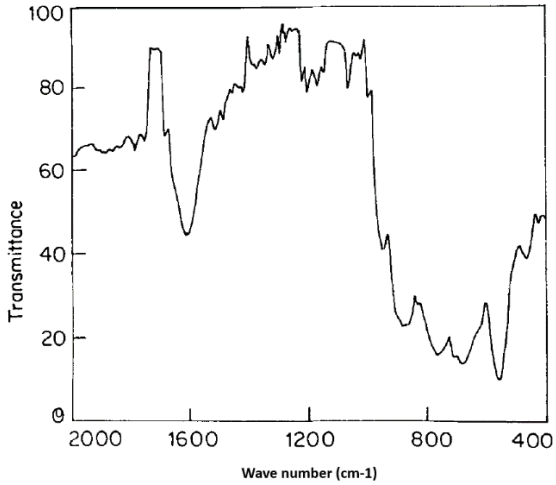


Рис. 2. Инфракрасные спектры тонких плёнок MoO_3 толщиной 200 нм.

Следующим этапом исследования стало изучение температурной зависимости постоянной электрической проводимости плёнок различной толщины. Измерения проводились при фиксированном напряжении смещения 0,8 В для образцов толщиной 200, 220 и 280 нм.

На рисунке 3 представлены зависимости электропроводности от температуры для исследованных образцов. Анализ полученных результатов показал, что температурное изменение проводимости характеризуется несколькими участками с различным характером поведения.

При построении графиков в координатах $\ln \sigma$ и $10^3/T$ для каждого образца наблюдаются две приблизительно линейные области. Это указывает на наличие двух температурных диапазонов, в которых реализуются различные значения энергии активации электрической проводимости.

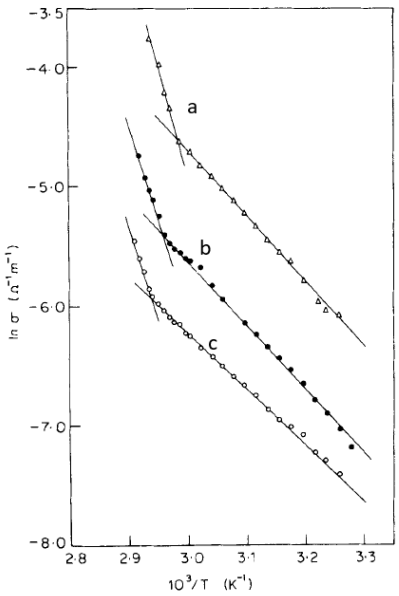


Рис. 3. Температурная зависимость постоянной электрической проводимости плёнок MoO_3 толщиной: (а) 200 нм; (б) 220 нм; (в) 280 нм.

Установлено, что значения энергии активации в низкотемпературной и высокотемпературной областях несколько изменяются в зависимости от толщины плёнки. Данное обстоятельство свидетельствует о влиянии геометрических и структурных характеристик плёночного слоя на процессы переноса электрического заряда.

Особый интерес представляют результаты исследования электрической проводимости MoO_3 под воздействием ультрафиолетового излучения. В данном эксперименте использовалась плёнка толщиной 200 нм. Измерения проводились при комнатной температуре с последовательной регистрацией изменения проводимости во времени.

Экспериментально установлено, что в начальный период ультрафиолетового облучения электрическая проводимость плёнки увеличивается. Однако с дальнейшим увеличением продолжительности воздействия наблюдается её снижение. Примерно через 30 минут после начала облучения проводимость приближается к относительно стабильному значению.

Одновременно с изменением электрических характеристик наблюдалось изменение окраски плёнки: первоначальный зеленовато-синий оттенок постепенно переходил в более тёмный синий цвет. Это указывает на взаимосвязь оптических и электрических процессов, происходящих в материале под воздействием ультрафиолетового излучения.

На рисунке 4 представлена зависимость электрической проводимости плёнки MoO_3 от продолжительности ультрафиолетового облучения.

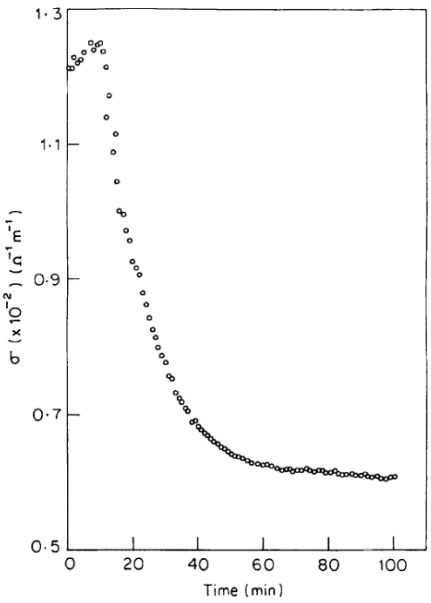


Рис. 4. Изменение постоянной электрической проводимости плёнки MoO_3 толщиной 200 нм в зависимости от времени ультрафиолетового облучения.

После прекращения облучения наблюдалась обратная динамика изменения электропроводности. В частности, проводимость увеличивалась и через определённое время достигала нового стационарного значения. Таким образом, электрическое состояние исследуемой плёнки зависит не только от самого факта воздействия ультрафиолетового излучения, но и от продолжительности облучения, а также от времени, прошедшего после его прекращения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии сложной взаимосвязи между структурными, оптическими и электрическими характеристиками тонких плёнок триоксида молибдена. Особенности температурной зависимости электропроводности, а также её изменение под воздействием ультрафиолетового излучения позволяют предположить, что в исследуемом материале существенную роль играют процессы переноса локализованных носителей заряда.

Согласно представлениям И. Г. Остина и Н. Ф. Мотта [6], электрическая проводимость ряда оксидов переходных металлов может осуществляться посредством прыжкового переноса малых поляронов. В рамках данного механизма движение носителей заряда сопровождается взаимодействием электронов с колебаниями кристаллической решётки. Такое взаимодействие оказывает влияние на эффективную подвижность носителей и, соответственно, на электрическую проводимость материала.

Наличие двух линейных участков на графиках зависимости $\ln \sigma$ от $10^3/T$ свидетельствует о возможном изменении преобладающего механизма переноса заряда в различных температурных диапазонах. При этом зависимость энергии активации от толщины плёнки может быть обусловлена изменениями

структурного состояния материала, концентрации дефектов и особенностями формирования межфазной границы между оксидным слоем и металлической подложкой.

Отдельного рассмотрения заслуживает изменение электрической проводимости под действием ультрафиолетового излучения. Наблюдаемое первоначальное увеличение проводимости с последующим снижением указывает на то, что фотостимулированные процессы в MoO_3 не ограничиваются простым увеличением концентрации свободных носителей заряда. Вероятно, в формировании наблюдаемой зависимости участвуют несколько взаимосвязанных механизмов, включая изменение зарядового состояния дефектов, захват носителей кислородными вакансиями и электрон-фононное взаимодействие.

Изменение окраски плёнки с зеленовато-синей на тёмно-синюю также представляет значительный научный интерес. Подобные изменения оптических характеристик оксидов молибдена могут быть связаны с образованием центров окраски, возникающих вследствие захвата электронов дефектными состояниями, в частности кислородными вакансиями. Формирование таких центров может сопровождаться изменением спектров поглощения и электрических характеристик материала.

Важным результатом эксперимента является изменение проводимости после прекращения ультрафиолетового воздействия. Наблюдаемое увеличение электропроводности с последующим установлением стационарного значения свидетельствует о наличии релаксационных процессов в исследуемой системе. Это позволяет предположить, что состояние плёнки после облучения определяется не только мгновенным воздействием света, но и особенностями последующего восстановления её электронного состояния.

Следует отметить, что для окончательного установления физического механизма наблюдаемых процессов необходимы дополнительные исследования, включающие анализ спектров поглощения до и после облучения, определение концентрации кислородных вакансий, а также изучение зависимости фотопроводимости от интенсивности и длины волны излучения.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает перспективность MoO_3 как функционального материала, электрические и оптические свойства которого могут изменяться под воздействием внешнего излучения. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем изучении фоточувствительных плёночных структур и разработке новых элементов оптоэлектронной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования получены тонкие плёнки триоксида молибдена на поверхности молибденовой подложки и изучены их основные электрические и оптические характеристики. Установлено, что формирование оксидного слоя происходит в процессе взаимодействия нагретой молибденовой подложки с остаточным кислородом, присутствующим в системе.

Структурный анализ позволил выявить особенности морфологии сформированных плёночных структур, характеризующихся наличием аморфных участков и столбчатых элементов. Результаты спектральных исследований с регистрацией характерных полос при 468, 580, 780, 890 и 1000 $см^{-1}$ согласуются с формированием плёнки на основе MoO_3.

Исследование температурной зависимости электрической проводимости образцов толщиной 200, 220 и 280 нм показало наличие двух температурных областей с различными значениями энергии активации. Установлено, что характер электропроводности зависит от толщины исследуемых плёнок, что может быть связано с особенностями их структурного состояния и механизмов переноса заряда.

Особое значение имеют результаты изучения фоточувствительных свойств MoO_3. Установлено, что при ультрафиолетовом облучении электрическая проводимость плёнки первоначально увеличивается, затем снижается и постепенно достигает стационарного значения. Одновременно наблюдается изменение окраски материала с зеленовато-синей на тёмно-синюю. После прекращения облучения проводимость вновь увеличивается и со временем стабилизируется.

Полученные результаты подтверждают чувствительность электрических и оптических свойств тонких плёнок MoO_3 к ультрафиолетовому излучению и свидетельствуют о перспективности дальнейшего исследования данного материала для применения в фоточувствительных элементах, электронных дисплеях и устройствах оптической памяти.

Список литературы:

1. Орлов В. М., Колосов В. Н. Магниетермическое восстановление оксидных соединений вольфрама и молибдена // Доклады Академии наук. Серия «Доклады химии». Т. 468. № 1. С. 162–166. ISSN 0869-5652.

2. Ченга Л., Плога К. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 584 с.

3. Музафарова С. А., Ташланова Д. М. Оптические свойства широкозонного триоксида молибдена MoO_3 // Global Science: Prospects and Innovations. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference.

4. Утамурадова Ш. Б., Музафарова С. А. Свойства широкозонного полупроводникового соединения триоксида молибдена MoO_3 // Материалы международной конференции «Бобек». – 26–27 мая 2023 г. – С. 45–47.

5. Anwar M., Hogarth C. A., Teoharis C. R. // Journal of Materials Science. – 1990. – Vol. 24. – P. 1108.
6. Austin I. G., Mott N. F. // Advances in Physics. – 1969. – Vol. 18. – P. 41.