

УДК 544.032

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ ОКСИДА МОЛИБДЕНА (VI) В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н.В. Борисова, Э.П. Суровой

ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»

E-mail: epsur@kemsu.ru

Спектрофотометрическим методом определены две спектральные области поглощения и отражения наноразмерных слоев MoO_3 – коротковолновая $\lambda < 330$ нм и длинноволновая $\lambda > 330$ нм. Спектрофотометрическим, гравиметрическим и микроскопическими методами установлено, что в атмосферных условиях степень превращения слоев MoO_3 ($d=10\text{...}130$ нм) при увеличении времени (1...140 мин) и температуры ($T=373\text{...}600$ К) термообработки (при постоянной толщине слоя), а также при уменьшении толщины слоев – возрастает. При термообработке слоев MoO_3 обнаружено уменьшение при $\lambda=350$ нм и увеличение при $\lambda=870$ нм максимумов поглощения. Предложена модель образования центров окраски, включающая: формирование в процессе приготовления слоя MoO_3 центра – анионной вакансии с одним захваченным электроном ($[(V_a)^{++} e]$), термический переход электрона из валентной зоны на уровень центра, захват центром второго электрона ($[(eV_a)^{++} e]$).

Получение наноразмерных слоев различных материалов, выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих под действием различных энергетических факторов, представляют значительный интерес как для физики и химии твердого состояния и общей теории гетерогенного катализа, так и в связи с необходимостью разработки реальных систем с управляемым уровнем чувствительности к различным внешним воздействиям. Среди разнообразных неорганических материалов особое место занимает оксид молибдена (VI). Оксид молибдена (VI) и системы на его основе привлекают внимание исследователей различного профиля [1–18]. MoO_3 используется для получения молибдена (его сплавов, многих других соединений молибдена, применяется как составная часть керамических глин, глазурей, эмалей, красителей. Его используют в качестве катализатора в органическом синтезе, при переработке нефти (крекинг, гидроочистка, риформинг), он добавляется в качестве присадки к моторным маслам. Оксид молибдена (VI), нанесенный на различные носители (диоксид титана, кремнезем), вызывает фотостимулированную конверсию метана и метансодержащих газовых смесей (в различных газовых композициях) с достаточно высоким выходом метанола, формальдегида, CO , CO_2 [13, 14]. Устройства на основе оксида молибдена (VI) могут быть рекомендованы к использованию в качестве электрохромных и фотохромных дисплеев [5, 13, 17], электрохромных зеркал или светоперераспределяющих фильтров [4–6], сенсоров для контроля содержания газов в атмосфере [10–12]. Основными регулирующими (регистрирующими) элементами в этих устройствах являются тонкие слои (пленки) оксида молибдена (VI). Известно также, что оптические и электрофизические свойства тонких пленок различных материалов в значительной степени зависят от их толщины, условий получения, материала подложки [19, 20]. Отмеченные практическая ценность, а также отсутствие к настоящему времени в отечественной и зарубежной литературе информации о систематических исследованиях влияния размерных эффектов на оптические свойства пленок оксида молибдена (VI) ставят правомерной и своевременной задачу комплексного исследования оптиче-

ских свойств наноразмерных слоев оксида молибдена (VI).

В настоящей работе представлены результаты цикла исследований, направленного на выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих в условиях атмосферы в наноразмерных слоях MoO_3 различной толщины в зависимости от температуры и времени теплового воздействия.

Объекты и методы исследования

Образцы для исследований готовили методом термического испарения в вакууме ($2 \cdot 10^{-3}$ Па) путем нанесения тонких (10...130 нм) слоев MoO_3 на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост ВУП-5М. В качестве испарителя использовали лодочки, изготовленные из молибдена толщиной $d=3 \cdot 10^{-4}$ м. Оптимальное расстояние от лодочки-испарителя до подложки составляет 8...9 см.

Подложками служили стекла от фотопластинок толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ м и площадью $(2\text{...}4) \cdot 10^{-4}$ м², которые подвергали предварительной обработке в концентрированной азотной кислоте, в растворе дихромата калия в концентрированной серной кислоте, в кипящей мыльной воде, промывали в дистиллированной воде и сушили [21, 22]. Обработанные подложки оптически прозрачны в диапазоне 300...1100 нм.

Толщину пленок MoO_3 определяли спектрофотометрическим, микроскопическим и гравиметрическим методами [21]. Гравиметрический метод кварцевого микровзвешивания основан на определении приращения массы (Δm) на единицу поверхности кварцевого резонатора (толщиной $h=0,1$ мм) после нанесения на нее пленки MoO_3 . Разрешающая способность при термостабилизации резонаторов на уровне $\pm 0,1$ К составляла $\Delta m=1 \cdot 10^{-8}\text{...}1 \cdot 10^{-9}$ г/см². Среднюю толщину пленки после взвешивания рассчитывали по формуле:

$$d_{\text{п}} = \Delta m / F_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{м}},$$

где Δm – приращение массы кварцевого резонатора после нанесения пленки MoO_3 , $F_{\text{п}}$ – площадь пленки на подложке, $\rho_{\text{м}}$ – удельная масса нанесенного вещества [21, 22].

Образцы подвергали термической обработке в сушильных шкафах «Memmert VE 300» и «SPT-200», в муфельной печи «Тулячка-ЗП» в интервале температур 373...600 К. При этом образцы помещали на разогретую до соответствующей температуры фарфоровую пластину и подвергали термической обработке в течение 1...140 мин. в атмосферных условиях. Регистрацию эффектов до и после термической обработки исследуемых образцов осуществляли гравиметрическим, микроскопическим и спектрофотометрическим (в диапазоне длин волн 190...1100 нм, используя спектрофотометр «Shimadzu UV-1700»), методами.

Результаты и обсуждение

При исследовании оптических свойств наноразмерных слоев MoO_3 , нанесенных на стеклянные подложки, до и после термической обработки в атмосферных условиях было установлено, что спектры поглощения и отражения образцов до термообработки в значительной степени зависят от их толщины. На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены представительные спектры поглощения и отражения слоев MoO_3 разной толщины в диапазоне $d=20...130$ нм. Видно, что для образцов разной толщины можно выделить характерные для пленок и монокристаллов MoO_3 [4, 6, 9, 10, 17] спектральные области поглощения и отражения – коротковолновую $\lambda < 330$ нм и длинноволновую $\lambda > 330$ нм. Определение оптической ширины запрещенной зоны слоев MoO_3 в значительной степени осложнено из-за наличия полосы поглощения в интервале $\lambda=330...400$ нм с максимумом при $\lambda=350$ нм. После предварительной термической обработки образцов в интервале температур 373...600 К в течение $\tau=1...120$ мин. полоса поглощения с максимумом $\lambda=350$ нм практически полностью исчезает. Край полосы поглощения пленок MoO_3 оценивали по формулам [23], используя спектры поглощения образцов, подвергнутых термической обработке. Установлено, что край полосы поглощения слоев MoO_3 находится при $\lambda \approx 320$ нм. Это значение удовлетворительно совпадает с краем полосы поглощения, определенным по спектрам диффузного отражения мелкокристаллических порошков и по результатам измерений спектра пропускания тонких нанесенных на кварцевую подложку пленок MoO_3 [8].

При толщине слоев $d \approx 10...20$ нм на спектрах поглощения наблюдается бесструктурное поглощение. При увеличении толщины слоев MoO_3 поглощение возрастает, и в области края поглощения начинает формироваться размытая полоса поглощения с максимумом при $\lambda=500$ нм. По мере увеличения толщины слоев MoO_3 ($d \approx 20...70$ нм) наблюдается смещение размытой полосы поглощения с максимумом при $\lambda=500$ нм в длинноволновую область спектра с максимумом при $\lambda=1020$ нм с одновременным формированием полосы поглощения в диапазоне $\lambda \approx 400...600$ нм. При толщине сло-

ев MoO_3 $d \approx 70...90$ нм проявляется максимум поглощения при $\lambda \approx 500$ нм и при $\lambda > 750$ нм наблюдается увеличение поглощения. При толщине слоев MoO_3 в диапазоне $d \approx 90...120$ нм на спектрах поглощения проявляются два размытых максимума при $\lambda \approx 450$ нм и 700 нм. Идентификация полос поглощения и отражения исходных слоев MoO_3 в длинноволновой области спектра требует тщательного исследования состояния поверхности, определения наличия и выявления роли примесей, структурных и собственных дефектов.

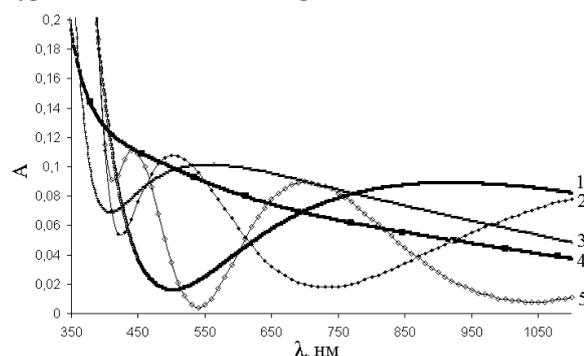


Рис. 1. Спектры поглощения пленок оксида молибдена (VI) толщиной: 1) 58, 2) 94, 3) 30, 4) 23, 5) 122 нм

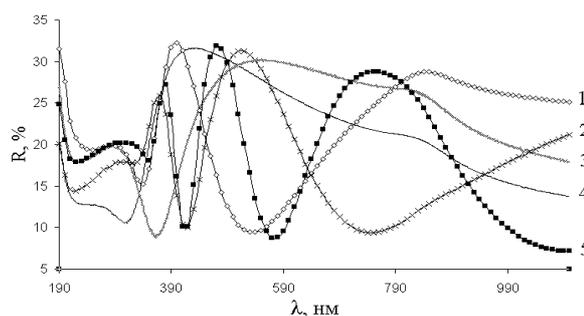


Рис. 2. Спектры отражения пленок оксида молибдена (VI) толщиной: 1) 58, 2) 94, 3) 30, 4) 23, 5) 122 нм

В результате термической обработки слоев MoO_3 разной толщины в интервале температур 373...600 К в атмосферных условиях спектры поглощения и отражения образцов претерпевают существенные изменения. Причем, наблюдаемые изменения спектров поглощения и отражения, а также предельные значения оптической плотности в максимумах полос поглощения после термической обработки образцов зависят от первоначальной толщины пленок MoO_3 , температуры и времени термообработки. На рис. 3 в качестве примера приведены спектры поглощения пленок MoO_3 толщиной $d=46$ нм до и после термической обработки при 423 К.

В процессе термической обработки на спектрах поглощения слоев MoO_3 наблюдаются следующие изменения: во-первых, оптическая плотность образца в интервале $\lambda=330...400$ нм с максимумом $\lambda=350$ нм (центр 1) уменьшается (что приводит к смещению края полосы поглощения в коротковолновую область спектра) и возрастает в интервале $\lambda=400...1000$ нм с максимумом $\lambda=870$ нм (центр 2).

При увеличении или уменьшении температуры термообработки закономерности изменения спектров поглощения независимо от исходной толщины слоев MoO_3 сохраняются – наблюдается уменьшение оптической плотности образцов в коротковолновой области спектра и, как следствие, смещение края полосы поглощения в область коротких длин волн. В длинноволновой области спектра для образцов толщиной $d > 20$ нм наблюдается увеличение (рис. 3), а для препаратов толщиной $d < 20$ нм уменьшение оптической плотности. При одинаковой исходной толщине слоев MoO_3 с увеличением температуры термообработки имеет место более быстрое возрастание эффектов изменения оптической плотности. По мере увеличения толщины слоев MoO_3 (вплоть до 130 нм) при постоянной температуре (в интервале 373...600 К) и времени термической обработки, наблюдается последовательное уменьшение эффектов изменения оптической плотности образцов во всем исследованном спектральном диапазоне. Предельные значения изменений оптической плотности при увеличении толщины пленок MoO_3 возрастают.

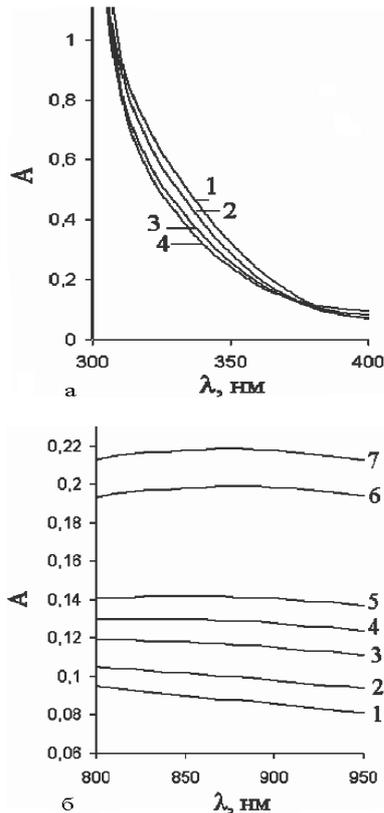


Рис. 3. Спектры поглощения слоя оксида молибдена (VI) толщиной 46 нм до и после термической обработки при 423 К: (а) 1) без термообработки, 2) 10, 3) 60, 4) 160 мин., (б) 1) без термообработки, 2) 2, 3) 5, 4) 10, 5) 20, б) 60, 7) 160 мин

Для выяснения закономерностей протекания процесса термического превращения пленок оксида молибдена (VI) были рассчитаны и построены кинетические зависимости степени превращения $\alpha = f(\tau)$ (где τ – время термической обработки) при различ-

ных длинах волн и температурах термообработки. Для построения кинетических кривых в координатах $\alpha = f(\tau)$ был применен следующий подход.

Спектры поглощения слоев MoO_3 , измеренные при различных временах термической обработки, пересекаются в одной (изобестической) точке (положение ее зависит от толщины слоя MoO_3 , температуры термообработки), в которой оптическая плотность не зависит от времени термообработки. Слева и справа от изобестической точки поглощение (A) зависит от времени термической обработки, а при определенном времени термической обработки будет складываться из поглощения, связанного с наличием центра 1 (A_{I1}) и центра 2 (A_{I2}):

$$A_{\text{обр.}} = A_{I1} + A_{I2}.$$

Если обозначить через α степень термического превращения центра 1 в центр 2, то при $\lambda = 870$ нм, соответствующей спектральной области, в пределах которой центр 2 поглощает, а центр 1 практически не поглощает свет (рис. 3), текущие оптические плотности центра 1 (A_{I1}) и центра 2 (A_{I2}) можно представить в следующем виде:

$$A_{I1} = A_{I1}^1 (1 - \alpha),$$

$$A_{I2} = A_{I2}^1 \cdot \alpha,$$

где A_{I1}^1, A_{I2}^1 – предельная оптическая плотность центра 1 и центра 2 при $\lambda = 870$ нм.

В итоге получаем следующее выражение для степени термического превращения центра 1 в центр 2

$$A_{\text{обр.}} = A_{I1}^1 (1 - \alpha) + A_{I2}^1 \alpha,$$

$$\alpha = (A_{I1}^1 - A_{\text{обр.}}) / (A_{I1}^1 - A_{I2}^1).$$

Падающая по нормали на поверхность какой-либо системы световая волна от источника излучения, претерпевает зеркальное отражение, рассеяние, поглощение и пропускание [24, 25]. При прохождении через границы нескольких сред (воздух – MoO_3 – стеклянная подложка – воздух) с различными коэффициентами преломления n зеркально отраженная световая волна R будет складываться из нескольких составляющих:

$$R = R_1 + R_2 + R_3,$$

где R_1, R_2, R_3 – зеркально отраженная световая волна от границы: воздух – MoO_3 , MoO_3 – стеклянная подложка, стеклянная подложка – воздух.

Таким образом, измеряемое в реальных условиях на спектрофотометре полное значение оптической плотности включает (как минимум) несколько составляющих

$$A = A_{\text{обр.}} + A_{\text{отр.}} + A_{\text{рас.}},$$

где $A_{\text{обр.}}, A_{\text{отр.}}, A_{\text{рас.}}$ – значения оптической плотности образца, либо обусловленное потерями на зеркальное отражение $A_{\text{отр.}}$ или диффузное рассеяние света поверхностью образца $A_{\text{рас.}}$.

Специальными исследованиями было установлено, что диффузное рассеяние поверхностью пленок MoO_3 пренебрежимо мало по сравнению с зеркальным отражением (рис. 2) и, как следствие, $A_{\text{рас.}}$ можно считать ≈ 0 . Тогда

$$A = A_{\text{обр.}} + A_{\text{отр.}}$$

После несложных преобразований окончательная формула для расчета истинного (вызванного поглощением света в веществе) значения оптической плотности выглядит как:

$$A_{\text{обр.}} = A + \lg(1-R).$$

Было установлено, что степень превращения слоев MoO_3 зависит от их первоначальной толщины, температуры и времени термической обработки. По мере увеличения времени термообработки степень превращения слоев MoO_3 (рассчитанная по изменению оптической плотности в полосе поглощения центра 2) возрастает. На рис. 4 в качестве примера приведены кинетические кривые степени превращения пленок MoO_3 при 423 К в зависимости от первоначальной толщины образцов.

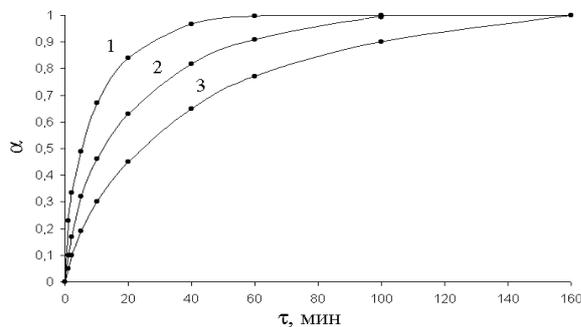


Рис. 4. Зависимость степени превращения от толщины пленок оксида молибдена (VI) при 423 К: 1) 28, 2) 59, 3) 89 нм

По мере уменьшения толщины слоев MoO_3 (при постоянном времени термообработки) степень превращения во всем исследованном интервале температур — возрастает. Увеличение температуры термообработки (при постоянной толщине пленок MoO_3) приводит к возрастанию скорости термического превращения (рис. 5).

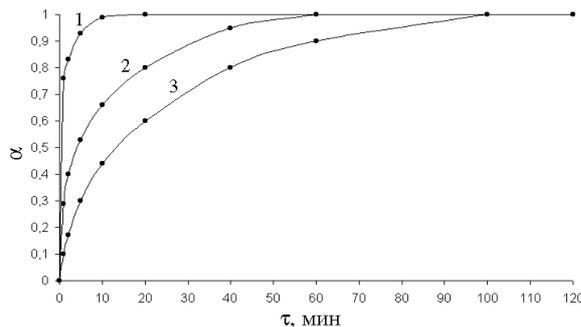


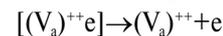
Рис. 5. Зависимость степени превращения пленок оксида молибдена (VI) толщиной 50...60 нм от температуры обработки 1) 573 К, 2) 523 К, 3) 473 К

Авторами [8] было установлено, что полоса поглощения с максимумом при $\lambda=350$ нм для монокристаллов MoO_3 связана со стехиометрическим недостатком кислорода и обусловлена вакансиями кислорода с одним захваченным электроном $[(V_a)^{++}e]$ (аналог F -центра). Этот центр, видимо, формируется в процессе приготовления слоев MoO_3 различной толщины. Глубина залегания этого $[(V_a)^{++}e]$ -центра

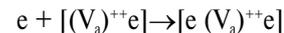
составляет $E_F^1=3,54$ эВ. Мы полагаем, что уменьшение максимума поглощения при $\lambda=350$ нм, а также формирование максимума поглощения при $\lambda=870$ нм в процессе термической обработки слоев MoO_3 — взаимосвязанные процессы, которые являются результатом преобразования центра $[(V_a)^{++}e]$.

Известно [23], что при возбуждении электронной подсистемы твердого тела могут иметь место переходы электрона в k пространстве из валентной зоны в зону проводимости, из валентной зоны на акцепторный уровень, с донорного уровня в зону проводимости, с нижнего заполненного уровня на верхний незаполненный.

Для того, чтобы обеспечить при термическом возбуждении электронной подсистемы твердого тела переход электрона с нижнего заполненного уровня на верхний незаполненный и обеспечить достаточную скорость этого процесса, необходимо, чтобы средняя энергия фонона (kT) соответствовала величине преодолеваемого энергетического барьера. Преобразование $[(V_a)^{++}e]$ -центра можно осуществить путем перевода электрона с уровня залегания центра на дно зоны проводимости



(для обеспечения этого процесса потребуются энергия E_F^1) либо путем перевода электрона с потолка валентной зоны на уровень центра



(для обеспечения этого процесса потребуются энергия $E = E_{\text{шзз}} - E_F^1$, где $E_{\text{шзз}}$ — термическая ширина запрещенной зоны MoO_3 . $E_{\text{шзз}} = 3,54$ эВ — меньше на 0,2...0,3 эВ чем оптическая ширина запрещенной зоны [8]). Оценим возможность осуществления указанных процессов в реальных условиях эксперимента. Фононы не моноэнергетичны. Их распределение по энергиям подчиняется уравнению Больцмана [23]. Согласно уравнению Больцмана всегда есть вероятность того, что при температурах 373...600 К будет существовать фонон с энергией равной $E_F^1=3,28$ эВ или $E=0,26$ эВ. (Для обеспечения термически активируемых переходов затраты энергии будут составлять 0,2...0,3 эВ от оптических [8]). Уравнение для скорости процесса термического возбуждения электрона с уровней F -центра на дно зоны проводимости или термического возбуждения электрона с потолка валентной зоны на уровни F -центра можно представить в следующем виде

$$W = \nu N_{\text{exp}} (-\Delta E/k_0 T),$$

где ν — частотный фактор (для фононов по порядку величины составляет $10^{13}...10^{14}$), N — концентрация $[(V_a)^{++}e]$ -центров, ΔE — величина преодолеваемого барьера ($E_F^1=3,28$ эВ, $E=0,26$ эВ), k_0 — постоянная Больцмана ($8,57 \cdot 10^{-5}$ эВ/Т), T — температура (600 К).

Если принять концентрацию $[(V_a)^{++}e]$ -центров 10^{16} см^{-3} (и считать, что все анионные вакансии в MoO_3 заняты по одному электрону в каждой), то в идеальном случае (когда все электроны достигнут предназначенного для них места и не примут участия в других процессах) значения для скорости

процесса термического возбуждения электрона с уровней $[(V_a)^{++}e]$ -центра на дно зоны проводимости или термического возбуждения электрона с потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++}e]$ -центра составят $W_1 \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и $W_2 \approx 6 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. Отсюда следует, что при термическом возбуждении электронов с уровней $[(V_a)^{++}e]$ -центра в зону проводимости в $\text{см}^3 \text{ MoO}_3$ за одну секунду переходит $\approx 10^4$ электронов – то есть исчезающе ма-

лое количество. Скорость процесса термического возбуждения электронов с потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++}e]$ -центра достаточно велика, чтобы обеспечить дальнейшие превращения слоя MoO_3 . По-видимому, широкая полоса поглощения с максимумом при $\lambda = 870 \text{ нм}$, связана с формированием $[e(V_a)^{++}e]$ -центров.

Работа поддержана грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ – 20.2003.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Третьяков Ю.Д. Химия нестехиометрических окислов. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. – 364 с.
- Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шаплыгин И.С. Химические и физические свойства простых оксидов металлов. – М.: Наука, 1983. – 239 с.
- Васько А.Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
- Лусис А.Р., Клявинь Я.К., Клеперис Я.Я. Электрохимические процессы в твердотельных электрохромных системах // Электрохимия. – 1982. – Т. 18. – № 11. – С. 1538–1541.
- Гуревич Ю.Я. Твердые электролиты. – М.: Наука, 1986. – 176 с.
- Лусис А.Р., Клеперис Я.Я. Электрохромные зеркала – твердотельные ионные устройства // Электрохимия. – 1992. – Т. 28. – Вып. 10. – С. 1450–1455.
- Вертопрахов В.Н., Сальман Е.Г. Термостимулированные токи в неорганических веществах. – Новосибирск: Наука, 1979. – 336 с.
- Школьник А.Л. Оптические свойства MoO_3 // Известия АН СССР. Серия «Физика». – 1967. – Т. 31. – № 12. – С. 2030–2051.
- Tubbs M.R. Optical Properties, Photographic and Holographic Applications of Photochromic and Electrochromic Layers // Brit. J. Appl. Phys. – 1964. – V. 15. – P. 181–198.
- Arnoldussen T.C. Electrochromism and photochromism in MoO_3 films // J. Electrochem. Sol.: Solid-State Science and Technology. – 1976. – V. 123. – P. 527–531.
- Раманс Г.М. Структура и морфология аморфных пленок триоксида вольфрама и молибдена // Электрохромизм. – Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1987. – 143 с.
- Maosong Tong, Guorui Dai. WO_3 thin film prepared by PECVD technique and its gas sensing properties to NO_2 // Journal of Materials Science. – 2001. – V. 36. – P. 2535–2538.
- Андреев В.Н., Никитин С.Е. Исследование фотохромных кластерных систем на основе оксидов Мо методом ЭПР-спектроскопии // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 755–758.
- Халманн М. Фотохимическая фиксация диоксида углерода // Энергетические ресурсы сквозь призму фотохимии и фотокатализа. – М.: Мир, 1986. – С. 549–578.
- Груздков Ю.А., Савинов Е.Н., Пармон В.Н. Фотокатализ дисперсными полупроводниками // Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Гетерогенные, гомогенные молекулярные структурно-организованные системы. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 138–179.
- Порай-Кошиц М.А., Атовмян Л.О. Кристаллохимия и стереохимия координационных соединений молибдена. – М.: Наука, 1974. – 232 с.
- Yao J.N., Yang Y.A., Loo V.H. Enhancement of Photochromism and Electrochromism in MoO_3/Au and MoO_3/Pt Thin Films // J. Phys. Chem. B. – 1998. – V. 102. – P. 1856–1860.
- Гончаров И.Б., Фиалко У.Ф. Ионный циклотронный резонанс в реакциях ионных кластеров оксида молибдена с аммиаком // Журнал физической химии. – 2002. – Т. 76. – № 9. – С. 1610–1617.
- Технология тонких пленок: Справочник: пер. с англ. / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – М.: Советское радио, 1977. – Т. 1. – 664 с.
- Борисова Н.В., Суевой Э.П., Титов И.В. Закономерности изменения свойств пленок меди в процессе термической обработки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 86–90.
- Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 592 с.
- Суевой Э.П., Бин С.В., Борисова Н.В., Титов И.В. Релаксация тока в наноразмерных пленках оксида вольфрама (VI) // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 102–106.
- Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1973. – 456 с.
- Гуревич М.М. Фотометрия. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
- Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

Поступила 22.12.2006 г.