

ХИМИЯ

УДК 544.032

ТЕРМОАКТИВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ Al - MoO₃

Э. П. Суровой, Н. В. Борисова

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

Получение гетерогенных систем, выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих в них под действием различных энергетических факторов, представляют для физики и химии твердого тела многосторонний интерес [1 - 6]. Постановка подобных исследований, наряду с их технической актуальностью, может быть полезным инструментом для выяснения механизма процессов превращений в твердых телах [1, 2]. Среди разнообразных неорганических материалов особое место занимает оксид молибдена (VI) [3 - 20]. MoO₃ используется для получения молибдена и многих других соединений на его основе, 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, CO₂ [16, 17]. Устройства на основе оксида молибдена (VI) могут быть рекомендованы к использованию в качестве электрохромных и фотохромных дисплеев [7, 15, 19], электрохромных зеркал или светоперераспределяющих фильтров [6 - 8],

сенсоров для контроля содержания газов в атмосфере [12 - 14]. Основными регулирующими (регистрирующими) элементами в этих устройствах являются тонкие 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 [2, 21]. Отмеченные практическая ценность, а также отсутствие к настоящему времени в отечественной и зарубежной литературе информации о систематических исследованиях влияния размерных эффектов на оптические свойства систем алюминий – оксид молибдена (VI) ставят правомерной и своевременной задачу комплексного исследования оптических свойств индивидуальных и двухслойных наноразмерных слоев оксида молибдена (VI) и алюминия.

В настоящей работе представлены результаты цикла исследований, направленного на выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих в условиях атмосферы в индивидуальных и двухслойных наноразмерных слоях оксида молибдена (VI) и алюминия различной толщины в зависимости от температуры и времени термообработки.

Объекты и методы исследования

Образцы для исследований готовили методом термического испарения в вакууме ($2 \cdot 10^{-3}$ Па) путем нанесения тонких (2 - 200 нм) слоев MoO₃ и Al на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост «ВУП-5М». Гетеросистемы Al – MoO₃ готовили путем последовательного нанесения слоев

MoO₃ (на предварительно нанесенный на подложки из стекла) слой Al. 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 $2 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ м², которые подвергали предварительной обработке в растворе дихромата калия в концентрированной серной кислоте, промывали в дистиллированной воде и сушили [2, 22]. Обработанные подложки оптически прозрачны в диапазоне 300 - 1100 нм. Толщину пленок Al и MoO₃ определяли спектрофотометрическим, эллипсометрическим, микроскопическим и гравиметрическим методами [2]. Образцы подвергали термической обработке в сушильных шкафах «Memmert BE 300» в интервале температур 373 - 573 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. Измерения фотоЭДС (U_{ϕ}) проводили на высоковакуумном экспериментальном комплексе, включающем электрометрический вольтметр В7-30. В качестве источников излучения применяли ртутную (ДРТ-250) и ксеноновую (ДКСШ-1000) лампы. Для выделения требуемого участка спектра использовали монохроматоры МДР-2 и SPM-2, светофильтры. Актинометрию источников света проводили с помощью радиационного термоэлемента РТ-0589. Контактную разность потенциалов (КРП) между алюминием, оксидом молибдена (VI) и электродом сравнения из платины измеряли, используя модифицированный метод Кельвина.

Результаты и их обсуждение

В результате систематического исследования оптических свойств наноразмерных пленок MoO₃ и Al, а также двухслойных систем Al - MoO₃ до и после термической обработки в атмосферных условиях было установлено, что спектры поглощения и отражения образцов до термообработки в значительной степени зависят от толщины каждого из слоев MoO₃ и Al. При термической обработке пленок Al, независимо от их толщины, имеет место уменьшение оптической плотности [23]. По мере увеличения температуры термообработки и уменьшения толщины пленок алюминия наблюдается увеличение скорости процесса окисления. При термической обработке пленок MoO₃ разной толщины установлено увеличение, уменьшение, увеличение и последующее уменьшение оптической плотности [24]. С увеличением температуры и уменьшением толщины пленок скорость превращения MoO₃ возрастает. Предельная после термической активации оптическая плотность

MoO₃ в длинноволновой области спектра увеличивается.

При сопоставлении спектров поглощения пленок Al, MoO₃ и систем Al - MoO₃ было установлено, что на спектрах поглощения систем проявляются рефлексы индивидуальных пленок Al и MoO₃ в степенях, соответствующих соотношению толщины подслоев. Преимущественно в области 500-1100 нм в большей степени проявляются рефлексы пленки алюминия. Вид кривых в коротковолновой области спектра определяется характерным для пленок MoO₃ поглощением, что в наибольшей степени проявляется для систем с толщиной подслоя Al менее 20 нм. Установлено, что спектральные кривые зеркального отражения исследуемых образцов существенно зависят от толщины слоев и в большей степени определяются толщиной пленок MoO₃. Максимум при $\lambda = 380$ нм, присущий индивидуальным пленкам MoO₃ [24], при увеличении толщины MoO₃ в двухслойной системе становится более выраженным и смещается в длинноволновую область.

Для выяснения возможного взаимодействия между пленками Al и MoO₃ в процессе приготовления систем Al - MoO₃ были сопоставлены экспериментальные спектры поглощения систем со спектрами поглощения, полученными суммированием спектров поглощения индивидуальных пленок Al и MoO₃ аналогичной толщины. Установлено, что расчетные и экспериментальные кривые для всех исследованных образцов не совпадают. На экспериментальных кривых проявляется широкая полоса поглощения с максимумом при $\lambda \approx 870$ нм, наличие которой, видимо, связано с формированием при приготовлении систем дополнительного количества центров $[e(V_a)^{++}e]$ [24]. На рис. 1 приведены экспериментальные и рассчитанные спектры поглощения пленок MoO₃, Al и систем Al - MoO₃.

В результате термической обработки систем Al - MoO₃ разной толщины в интервале температур ($T = 373 - 573$ 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 Al и MoO₃, температуры и времени термообработки.

Все исследованные системы Al - MoO₃ по характеру изменения оптических свойств образцов в процессе термической обработки были классифицированы с разделением на 4 группы.

К первой группе были отнесены образцы, для которых оптическая плотность индивидуальных пленок MoO₃, Al, а также двухслойных систем Al - MoO₃ в процессе тепловой обработки уменьшается. Такое поведение характерно для систем, толщина пленок MoO₃ которых составляет ≤ 20 нм, независимо от толщины пленки Al.

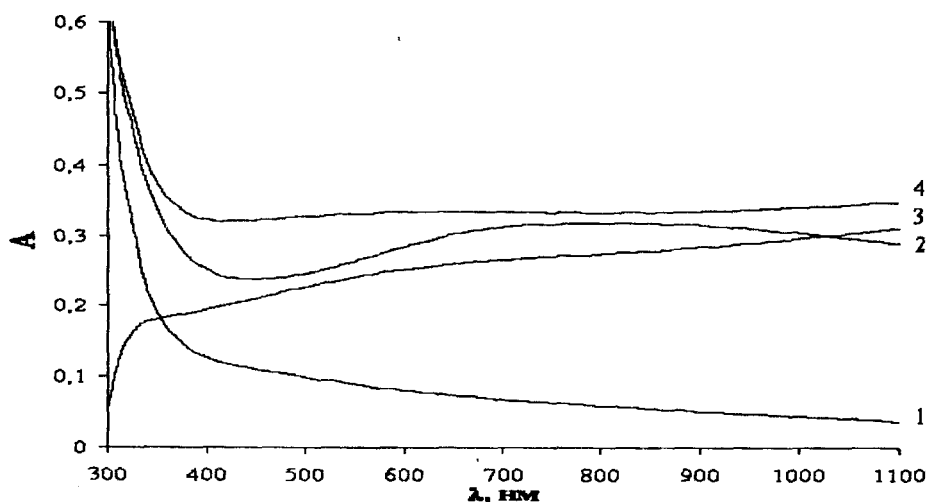


Рис. 1. Экспериментальные (1, 2, 3) и рассчитанный (4) спектры поглощения: 1) MoO_3 , 2) $\text{Al} - \text{MoO}_3$, 3) Al , 4) $\text{Al} - \text{MoO}_3$ ($d(\text{Al}) = 19 \text{ нм}$, $d(\text{MoO}_3) = 23 \text{ нм}$)

Ко второй группе были отнесены образцы, для которых в процессе тепловой обработки наблюдается увеличение оптической плотности индивидуальных пленок MoO_3 и уменьшение оптической плотности пленок Al и двухслойных образцов $\text{Al} - \text{MoO}_3$. К данной группе отнесены системы, имеющие толщину пленки MoO_3 20 - 30 нм и Al 15 - 200 нм.

В третью группу были включены образцы, для которых оптическая плотность пленок MoO_3 , систем $\text{Al} - \text{MoO}_3$ в результате теплового воздействия возрастает, а пленки Al — уменьшается.

К четвертой группе были отнесены образцы, обладающие «термохромным эффектом» (ТХЭ). В процессе термической обработки для этих систем наблюдается увеличение и уменьшение оптической плотности симбиотное с аналогичными изменениями оптической плотности для пленок MoO_3 . Для пленок Al наблюдается уменьшение оптической плотности. Условия проявления ТХЭ следующие: толщина пленки Al менее 10 нм, различие в толщинах слоев $\approx 30 \text{ нм}$, температура обработки $> 473 \text{ К}$. На рис. 2 представлены спектры поглощения образца $\text{Al} - \text{MoO}_3$ ($d_{\text{MoO}_3} = 20 \text{ нм}$ и $d_{\text{Al}} = 2 \text{ нм}$) четвертой группы.

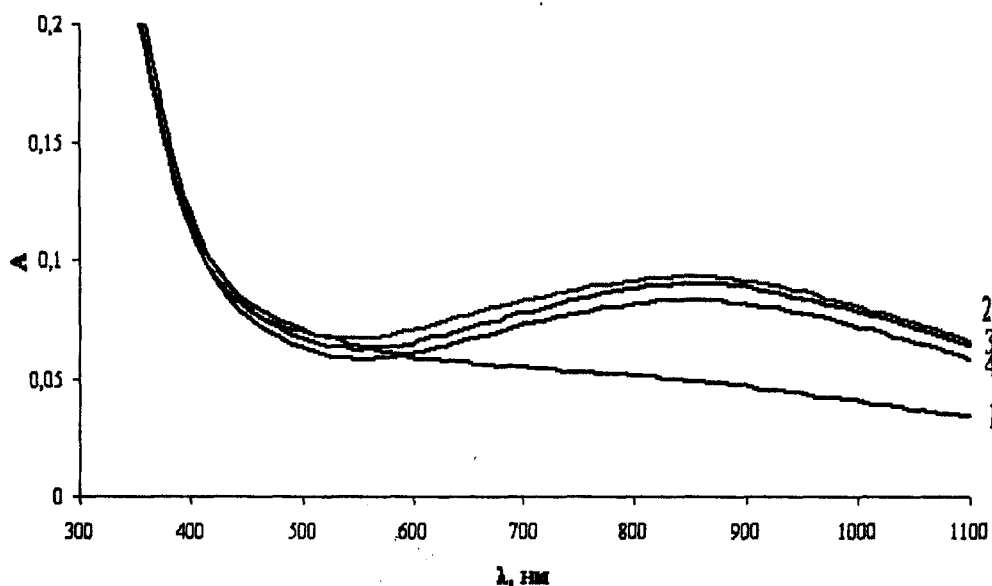


Рис. 2. Спектры поглощения системы $\text{Al} - \text{MoO}_3$ ($d_{\text{MoO}_3} = 20 \text{ нм}$, $d_{\text{Al}} = 2 \text{ нм}$) до (1) после термообработки при 573 К в течение 5 (2), 20 (3), 30 (4) мин.

Для выяснения закономерностей протекания процесса термического превращения в системах $\text{Al} - \text{MoO}_3$ 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 $\alpha = f(\tau)$ использовали выражение $\alpha = (A_0 - A) / (A_0 - A_\infty)$,

где A_0 , A , A_∞ – начальное, текущее и конечное значения оптической плотности образца при $\lambda = 870$ нм.

Истинное (вызванное поглощением света в веществе) значение оптической плотности ($A_{обр}$) рассчитывали по следующей формуле [2, 25]:

$$A_{обр} = A + \lg(1 - R),$$

где A , R – экспериментальные значения оптической плотности и коэффициента отражения.

Было установлено, что степень превращения систем Al – MoO₃ зависит от первоначальной толщины слоев Al, MoO₃, температуры и времени термической обработки. По мере увеличения времени термообработки степень превращения систем Al – MoO₃ возрастает. Увеличение температуры термообработки (при постоянной толщине пленок Al и MoO₃) приводит к возрастанию скорости термического превращения. По мере уменьшения толщины пленки Al (при постоянной толщине слоя MoO₃) в системе Al – MoO₃ при постоянном времени термообработки степень превращения во всем исследованном интервале температур возрастает.

Для выяснения энергетического строения контактов оксида молибдена (VI) с алюминием и причин, вызывающих наблюдаемые изменения металлом оптических свойств MoO₃ в разных спектральных областях, были измерены U_ϕ для гетеросистем Al – MoO₃ и значения КРП между MoO₃, Al и электродом сравнения из платины. В результате измерений U_ϕ в диапазоне $\lambda = 300$ –1100 нм было установлено, что в процессе облучения светом формируется U_ϕ положительного потенциала со стороны слоя MoO₃. Из анализа результатов измерений U_ϕ и КРП (табл. 1) было установлено, что в области контакта оксида молибдена (VI) с алюминием образуется антизапорный слой.

Полученные в настоящей работе и ранее [4 – 8, 10, 11] результаты исследований свидетельствуют о контактной природе эффектов изменения алюмином скорости термического превращения пленок MoO₃.

Наблюдаемое (табл. 1) отличие работ выхода MoO₃ и Al свидетельствует о возможности при формировании плотного контакта и установлении в системе Al – MoO₃ состояния термодинамического равновесия потока электронов из алюминия в оксид молибдена (VI).

Таблица 1

КРП между образцами и электродом сравнения из платины при $T = 293$ К

Образец	КРП, В		
	$P = 1 \cdot 10^5$ Па	$P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па	$P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па*
Al пленка ($d = 250$ нм) на стекле	+1,10	+1,10	+1,40
Al пленка ($d = 56$ нм) на стекле	+1,10	+1,10	+1,60
Al пленка ($d = 250$ нм) на платиновой пластине	+1,2	+1,2	+1,50
MoO ₃ пленка ($d = 220$ нм) на стекле	+0,72	+0,71	+0,66

* После предварительной тепловой обработки при $T = 550$ К в течение 180 мин.

Формирование U_ϕ для гетеросистем Al – MoO₃ прямо свидетельствует о разделении неравновесных носителей заряда на границе раздела. Мы полагаем, что при создании контакта оксида молибдена (VI) с алюминием в результате электронных переходов приконтактный слой MoO₃ заряжается отрицательно. Диаграмма энергетических зон гетеросистем Al – MoO₃, при построении которой использованы результаты исследований спектрального распределения U_ϕ , КРП (табл. 1), приведена на рис. 3.

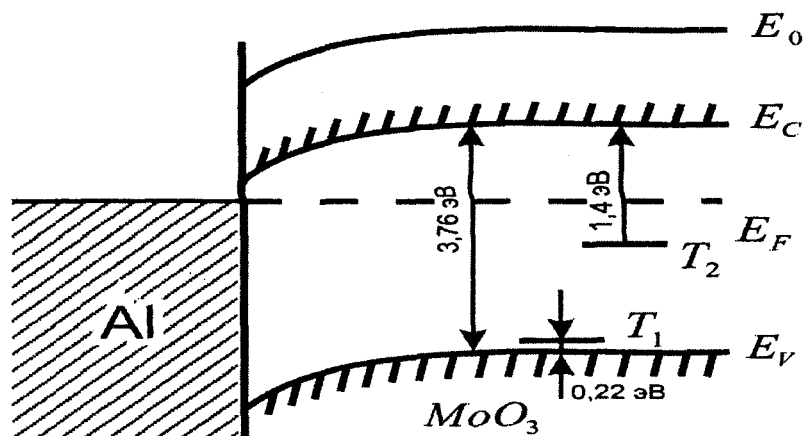


Рис. 3. Диаграмма энергетических зон гетеросистемы Al – MoO₃: E_V – уровень потолка валентной зоны, E_C – уровень дна зоны проводимости, E_F – уровень Ферми, E_0 – уровень вакуума, T_1 , T_2 – центры захвата

Авторами [10] 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 (центр T_1) 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 и являются результатом преобразования $[(V_a)^{++} e]$ - центра.

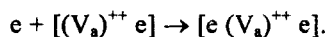
Известно [26], что при возбуждении электронной подсистемы твердого тела могут иметь место переходы электрона в k пространстве из валентной зоны в зону проводимости, из валентной зоны на акцепторный уровень, с донорного уровня в зону проводимости, с нижнего заполненного уровня на верхний незаполненный. Для того, чтобы при термическом возбуждении электронной подсистемы твердого тела обеспечить 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 при термическом возбуждении MoO_3 можно осуществить:

1) путем перевода электрона с уровня залегания центра на свободные уровни вблизи дна зоны проводимости с освобождением анионной вакансии $(V_a)^{++}$:



Для обеспечения этого процесса потребуется энергия E_F^1 .

2) путем перевода электрона с уровней расположенных вблизи потолка валентной зоны анионной по природе на уровень центра $[(V_a)^{++} e]$ с образованием нейтрального центра $[e (V_a)^{++} e]$ (центр T_2):



Для обеспечения этого процесса потребуется энергия $E = E_{\text{шзз}}^T - E_F^1$, где $E_{\text{шзз}}^T$ - термическая ширина запрещенной зоны MoO_3 . Термическая ширина запрещенной зоны MoO_3 , согласно [10], $E_{\text{шзз}} = 3,54$ эВ (на 0,2 - 0,3 эВ меньше, чем оптическая ширина запрещенной зоны MoO_3 , $E_{\text{шзз}}^o = 3,76$ эВ). Оценим возможность осуществления указанных переходов при термическом возбуждении MoO_3 в реальных условиях эксперимента. Фононы не моноэнергетичны. Их распределение по энергиям подчиняется уравнению Больцмана [23]. Согласно уравнению Больцмана, всегда есть вероятность того, что в интервале температур $T = 373-573$ К (область температур, при которых осуществлялась термообработка образцов MoO_3) будет существовать фонон с энергией, равной $E_F^1 = 3,28$ эВ или $E = 0,26$ эВ. (Для обеспечения термически активируемых переходов затраты энер-

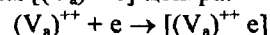
гии будут составлять 0,2 - 0,3 эВ от оптических [10]). Уравнение для скорости процесса термического возбуждения электрона с уровней $[(V_a)^{++} e]$ - центра на уровни вблизи дна зоны проводимости или термического возбуждения электрона с уровней вблизи потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра можно представить в следующем виде:

$$W = \nu \cdot N \cdot \exp(-\Delta E / k_0 T),$$

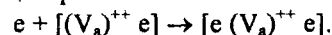
где ν - частотный фактор (для фононов по порядку величины составляет $10^{13}-10^{14}$), N - концентрация $[(V_a)^{++} e]$ - центров, ΔE - величина преодолеваемого барьера ($E_F^1 = 3,28$ эВ, $E = 0,26$ эВ), k_0 - постоянная Больцмана ($8,57 \cdot 10^{-5}$ эВ/Т), T - температура (максимальная температура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

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 скоростей процессов термического возбуждения электрона с уровней $[(V_a)^{++} e]$ - центра на уровни вблизи дна зоны проводимости или термического возбуждения электрона с уровней вблизи потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра составят $W_1 \approx 2 \cdot 10^1 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ 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 $\approx 10^1$ электронов, т. е. исчезающе малое количество. Скорость процесса термического возбуждения электронов с уровней вблизи потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра достаточно велика, чтобы обеспечить дальнейшие превращения слоя MoO_3 .

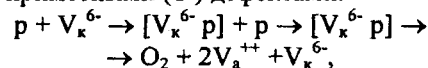
Таким образом, в процессе приготовления (т. е. термического испарения и осаждения на стеклянные подложки) термической обработки в интервале температур $T = 373-573$ К слоев MoO_3 имеет место переход электронов из валентной зоны с образованием дырок (p) на уровни анионной вакансии с формированием $[(V_a)^{++} e]$ - центра:



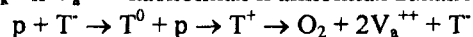
и на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра с формированием $[e (V_a)^{++} e]$ - центра:



Дырки могут захватываться собственными $(V_k^{\bullet})$ и примесными (Т) дефектами:



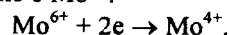
где $V_k^{\bullet}$ и V_a^{++} - катионная и анионная вакансии,



с выделением кислорода и освобождением анионных вакансий.

Оптическая энергия ионизации $[e (V_a)^{++} e]$ - центра составляет $\approx 1,4$ эВ, термическая - $\approx 1,1$ эВ. Мы полагаем, что в процессе термообработки возможна термическая ионизация $[e (V_a)^{++} e]$ - центра, сопровождающаяся переходом электронов в зону проводимости:

$[e(V_a)^{++}e] \rightarrow 2e + (V_a)^{++}$
и взаимодействие с Mo^{6+} :



Увеличение концентрации электронов со стороны MoO_3 в состоянии термодинамического равновесия гетеросистемы Al - MoO_3 должно привести к увеличению скорости процесса термического превращения в MoO_3 . Наблюдаемые закономерности изменения алюминием оптических свойств MoO_3 соответствуют изложенной модели процессов.

Литература

1. Индутный, И. З. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл – полупроводник / И. З. Индутный, М. Т. Костышин, О. П. Касярум и др. – Киев: Наукова думка, 1992. – 240 с.
2. Борисова, Н. В. Формирование систем «медь – оксид меди (I)» в процессе термической обработки пленок меди / Н. В. Борисова, Э. П. Суrowой, И. В. Титов // Материаловедение. – 2006. – № 7. – С. 16 - 20.
3. Третьяков, Ю. Д. Химия нестехиометрических окислов / Ю. Д. Третьяков. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. – 364 с.
4. Лазарев, В. Б. Химические и физические свойства простых оксидов металлов / В. Б. Лазарев, В. В. Соболев, И. С. Шаплыгин. – М.: Наука, 1983. – 239 с.
5. Васько, А. Т. Электрохимия молибдена и вольфрама / А. Т. Васько. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
6. Лусис, А. Р. Электрохимические процессы в твердотельных электрохромных системах / А. Р. Лусис, Я. К. Клявинь, Я. Я. Клеперис // Электрохимия. – 1982. – Т. 18. – № 11. – С. 1538 – 1541.
7. Гуревич, Ю. Я. Твердые электролиты / Ю. Я. Гуревич. – М.: Наука, 1986. – 176 с.
8. Лусис, А. Р. Электрохромные зеркала – твердотельные ионные устройства / А. Р. Лусис, Я. Я. Клеперис // Электрохимия. – 1992. – Т. 28. – Вып. 10. – С. 1450 – 1455.
9. Вертопрахов, В. Н. Термостимулированные токи в неорганических веществах / В. Н. Вертопрахов, Е. Г. Сальман. – Новосибирск: Наука, 1979. – 336 с.
10. Школьник, А. Л. Оптические свойства MoO_3 / А. Л. Школьник // Известия АН СССР. Серия «Физика». – 1967. – Т. 31. – № 12. – С. 2050 – 2051.
11. Tubbs, M. R. Optical Properties, Photographic and Holographic Applications of Photochromic and Electrochromic Layers / M. R. Tubbs // Brit. J. Appl. Phys. – 1964. – V. 15. – P. 181 – 198.
12. Arnoldussen, Thomas C. Electrochromism and photochromism in MoO_3 films // J. Electrochem. Sol.: Solid-State Science and Technology. – 1976. – V. 123. – P. 527 – 531.
13. Раманс, Г. М. Структура и морфология аморфных пленок триоксида вольфрама и молибдена / Г. М. Раманс // Электрохромизм. – Рига: ЛГУ им. П. Стучки, 1987. – С. 121 – 129.
14. Maosong, Tong. WO_3 thin film prepared by PECVD technique and its gas sensing properties to NO_2 / Tong Maosong, Dai Guorui // Journal of Materials Science. – 2001. – V. 36. – P. 2535 – 2538.
15. Андреев, В. Н. Исследование фотохромных кластерных систем на основе оксидов Mo методом ЭПР-спектроскопии / В. Н. Андреев, С. Е. Никитин // Физика твердого тела. – 2001. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 755 – 758.
16. Халманн, М. Фотохимическая фиксация диоксида углерода / М. Халманн // Энергетические ресурсы сквозь призму фотохимии и фотокатализа. – М.: Мир, 1986. – С. 549 – 578.
17. Груздков, Ю. А. Фотокатализ дисперсными полупроводниками / Ю. А. Груздков, Е. Н. Савинов, В. Н. Пармон // Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Гетерогенные, гомогенные молекулярные структурно-организованные системы. – Новосибирск: Наука, 1991. – С. 138 – 179.
18. Порай-Кошиц, М. А. Кристаллохимия и стереохимия координационных соединений молибдена / М. А. Порай-Кошиц, Л. О. Атовмян. – М.: Наука, 1974. – 232 с.
19. Yao, J. N. Enhancement of Photochromism and Electrochromism in MoO_3/Au and MoO_3/Pt Thin Films / J. N. Yao, Y. A. Yang, B. H. Loo // J. Phys. Chem. B. – 1998. – V. 102. – P. 1856 – 1860.
20. Гончаров, И. Б. Ионный циклотронный резонанс в реакциях ионных кластеров оксида молибдена с аммиаком / И. Б. Гончаров, У. Ф. Фиалко // Журнал физической химии. – 2002. – Т. 76. – № 9. – С. 1610 – 1617.
21. Технология тонких пленок / под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. – М.: Советское радио, 1977. – Т. 1. – 664 с.
22. Титов, И. В. Исследование процесса окисления наноразмерных слоев меди: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04 / И. В. Титов. – Кемерово, 2006. – 118 с.
23. Борисова, Н. В. Закономерности формирования наноразмерных систем «алюминий – оксид алюминия» в процессе термической обработки пленок алюминия / Н. В. Борисова, Э. П. Суrowой // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 6. – С. 13 – 17.
24. Борисова, Н. В. Закономерности изменения оптических слоев оксида молибдена (VI) в результате термообработки / Н. В. Борисова, Э. П. Суrowой // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 68 – 72.
25. Эпштейн, М. И. Измерения оптического излучения в электронике / М. И. Эпштейн. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
26. Панков, Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Ж. Панков. – М.: Мир, 1973. – 456 с.