

Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл – полупроводник. Киев: Наукова думка, 1992. 240 с.

4. Суrowой Э.П., Сирик С.М., Бугерко Л.Н. // Хим. физика. 2000. Т. 19. № 8. С. 22.
5. Суrowой Э.П., Сирик С.М., Бугерко Л.Н. // Журн. физ. химии. 2000. Т. 74. № 5. С. 927.
6. Суrowой Э.П., Шурыгина Л.И., Бугерко Л.Н. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 12. С. 15.
7. Власов А.П., Суrowой Э.П. // Журн. физ. химии. 1991. Т. 65. № 6. С. 1465.
8. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2004. Т. 78. № 4. С. 663.
9. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2005. Т. 79. № 6. С. 1124.
10. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80. № 7. С. 1308.
11. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 7. С. 74.
12. Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Захаров Ю.А. и др. // Материаловедение. 2002. № 9. С. 27.
13. Суrowой Э.П., Сирик С.М., Захаров Ю.А. и др. // Журн. науч. и прикл. фотографии. 2002. Т. 47. № 5. С. 19.

14. Турова А.И., Адушев Г.П., Суrowой Э.П. и др. А.с. 1325332 СССР. // Б.И. 1987. № 27. С. 5.
15. Суrowой Э.П., И.В. Титов, Бугерко Л.Н. // Материаловедение. 2005. № 7. С. 15.
16. Суrowой Э.П., Борисова Н.В. // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84. № 2. С. 307.
17. Гаврищенко Ю.В. Фотолиз азидов тяжелых металлов и оптическая сенсibilизация этого процесса органическими красителями. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 1969. – 20 с.
18. Колесников Л.В. Спектры энергетических состояний и некоторые особенности реакций разложения азидов тяжелых металлов: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Минск: БГУ, 1978. 21 с.
19. Кригер В.Г. Кинетика и механизмы реакций твёрдофазного разложения азидов тяжёлых металлов: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Кемерово: КемГУ, 2002. 39с.
20. Захаров Ю.А., Савельев Г.Г., Щечков Г.Т. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1967. № 11. С. 1191.
21. Мейкляр Г.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. М.: Наука. 1972. 399 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА (VI)

С.В. Бин, Т.Ю. Кожухова, В.П. Морозов

Установлено, что при термообработке в течение ($t = 1 - 140$ мин) пленок WO_3 толщиной ($d = 7 - 160$ нм) в интервале температур ($T = 373 - 573$ К) наряду с уменьшением в диапазоне $\lambda = 300 - 400$ нм с максимумом $\lambda = 350$ нм наблюдается увеличение оптической плотности в области $\lambda = 400 - 1100$ нм с максимумом $\lambda = 850$ нм. Предложен механизм термического превращения пленок WO_3 .

Ключевые слова: оптические свойства, термопревращения, оксид вольфрама (VI)

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерные материалы, оксид вольфрама (VI) и системы на его основе привлекают внимание исследователей различного профиля [6-23]. Оптические и электрофизические свойства тонких пленок различных материалов в значительной степени зависят от их толщины, условий получения, материала подложки [12-14, 21-26].

В настоящей работе представлены результаты исследований, направленные на выяснение природы и закономерностей процессов, протекающих в условиях атмосферы в наноразмерных пленках оксида вольфрама (VI) различной толщины в зависимости от температуры и времени теплового воздействия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы для исследований готовили методом термического испарения в вакууме ($2 \cdot 10^{-3}$ Па) путем нанесения тонких (7 - 160 нм) пленок оксида вольфрама (VI) на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост «ВУП-5М» [21, 22, 25, 26]. Подложками служили стекла от фотопластинок, 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, 25, 26]. Обработанные подложки оптически прозрачны в диапазоне $\lambda = 300 - 1100$ нм. Толщину пленок оксида вольфрама (VI) определяли спектро-

фотометрическим (спектрофотометр «Shimadzu UV-1700»), микроскопическим (интерференционный микроскоп «МИИ-4»), эллипсометрическим (лазерный эллипсометр «ЛЭФ-3М») и гравиметрическим (кварцевый резонатор) методами [21, 22, 25]. Образцы помещали на разогретую до соответствующей температуры (373 - 573 К) фарфоровую пластину и подвергали термической обработке в течение 1 - 140 минут в сушильном шкафу «Memmert BE 300». Регистрацию эффектов до и после термической обработки образцов осуществляли гравиметрическим и спектрофотометрическим методами. При определении состава газов, выделяющихся при термической обработке образцов в высоком вакууме ($P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па), использовали лампу РМО-4С омегатронного масс-спектрометра ИГДО-1 [27]. Контактную разность потенциалов (КРП) между пленками WO_3 и электродом сравнения из платины измеряли до и после термической обработки образцов при температуре $T = 550$ К в течение 180 мин и давлениях ($P = 1,3 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^{-5}$ Па), используя модифицированный метод Кельвина [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований оптических свойств наноразмерных пленок оксида вольфрама (VI) было установлено, что спектры поглощения и отражения образцов до термической обработки существенно зависят от их толщины. Для образцов разной толщины можно выделить характерные для пленок и монокристаллов оксида вольфрама (VI) [8, 10-12, 14, 21, 22] – коротковолновую $\lambda < 330$ нм и длинноволновую $\lambda > 330$ нм области поглощения. Установлено, что край полосы поглощения пленок оксида вольфрама (VI) находится при $\lambda \approx 320$ нм. Это значение удовлетворительно совпадает с краем полосы поглощения и оптической шириной запрещенной зоны (3,86 эВ), определенным по спектрам диффузного отражения мелкокристаллических порошков и по результатам измерений спектра пропускания тонких нанесенных на кварцевую подложку пленок оксида вольфрама (VI) [7, 10-14, 18, 21, 22].

В результате термической обработки слоев разной толщины в интервале температур ($T = 373 - 573$ К) в атмосферных условиях спектры поглощения и отражения образцов претерпевают существенные изменения.

Наблюдаемые изменения спектров поглощения и отражения, а также предельные значения оптической плотности в максимумах полос поглощения, после термической обра-

ботки образцов зависят от первоначальной толщины пленок WO_3 , температуры и времени термообработки. На рис. 1 приведены спектры поглощения пленок оксида вольфрама (VI) толщиной $d = 25$ нм до и после термической обработки при $T = 523$ К.

Видно, что в процессе термической обработки оптическая плотность пленок оксида вольфрама (VI) в коротковолновой области спектра ($\lambda = 300 - 400$ нм с максимумом $\lambda = 350$ нм (центр 1)) уменьшается (рис. 1). При повышении (понижении) температуры, при которой осуществляли термическую обработку, закономерности изменения спектров поглощения независимо от исходной толщины пленок оксида вольфрама (VI) сохраняются – наблюдается уменьшение оптической плотности образцов в коротковолновой области спектра. В длинноволновой области спектра ($\lambda = 400 - 1100$ нм с максимумом $\lambda = 850$ нм (центр 2)) для образцов толщиной $d = 7 - 160$ нм наблюдается увеличение оптической плотности.

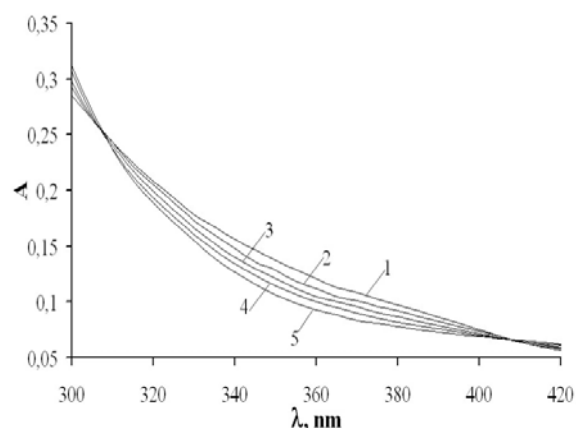


Рисунок 1. Спектры поглощения пленки оксида вольфрама (VI) толщиной 25 нм до (1) и после термической обработки при 523 К в течение 1 (2), 3 (3), 6 (4), 10 (5) мин.

При одинаковой толщине пленок WO_3 с увеличением температуры термообработки имеет место более быстрое возрастание эффектов изменения оптической плотности. По мере увеличения толщины пленок WO_3 (вплоть до 160 нм) при постоянной температуре (в интервале $T = 373 - 573$ 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 WO_3 возрастают.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА (VI)

Для выяснения закономерностей протекания процесса термического превращения пленок оксида вольфрама (VI) были рассчитаны и построены кинетические зависимости степени превращения $\alpha = f(\tau)$ (где τ – время термической обработки) при различных длинах волн и температурах термообработки. Для построения кинетических кривых был применен следующий подход. Спектры поглощения пленок оксида вольфрама (VI), измеренные при различных временах термической обработки, пересекаются в одной (изобестической) точке (рис. 1), 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 ($A_{ц1}$) и центра 2 ($A_{ц2}$):

$$A_{обр} = A_{ц1} + A_{ц2}$$

Если обозначить через α степень термического превращения центра 1 в центр 2, то при $\lambda = 850$ нм, соответствующей спектральной области, в пределах которой центр 2 поглощает, а центр 1 практически не поглощает свет (рисунок 1), текущие оптические плотности центра 1 ($A_{ц1}$) и центра 2 ($A_{ц2}$) можно представить в следующем виде:

$$A_{ц1} = A_{ц1}^1 (1 - \alpha),$$

$$A_{ц2} = A_{ц2}^1 \cdot \alpha,$$

где $A_{ц1}^1, A_{ц2}^1$ – предельная оптическая плотность центра 1 и центра 2 при $\lambda = 850$ нм.

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

$$A_{обр} = A_{ц1}^1 (1 - \alpha) + A_{ц2}^1 \alpha,$$

$$\alpha = (A_{ц1}^1 - A_{обр}) / (A_{ц1}^1 - A_{ц2}^1).$$

Было установлено, что степень превращения пленок оксида вольфрама (VI) зависит от их первоначальной толщины, температуры и времени термической обработки. По мере увеличения времени термообработки степень превращения пленок WO_3 (рассчитанная по изменению оптической плотности в полосе поглощения центра 2) возрастает. На рисунке 2 приведены кинетические кривые степени превращения центра 2 пленок WO_3 при 573 К в зависимости от первоначальной толщины образцов.

По мере уменьшения толщины пленок WO_3 (при постоянном времени термообработки) степень превращения во всем исследованном интервале температур возрастает. Увеличение температуры термообработки (при постоянной толщине пленок WO_3) приводит к возрастанию скорости термического превращения центра 2 (рисунок 3).

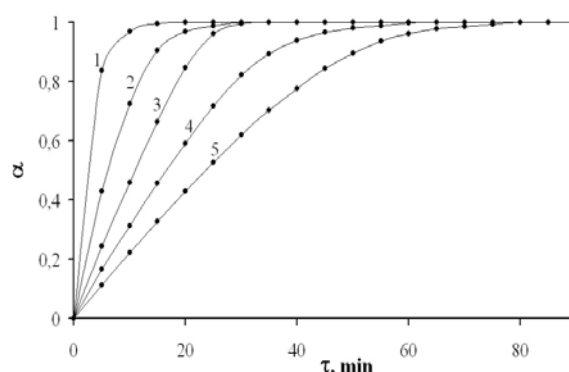


Рисунок 2. Зависимость степени превращения центра 2 от толщины пленок оксида вольфрама (VI) при 573 К: 1) 25, 2) 50, 3) 75, 4) 115, 5) 140 нм.

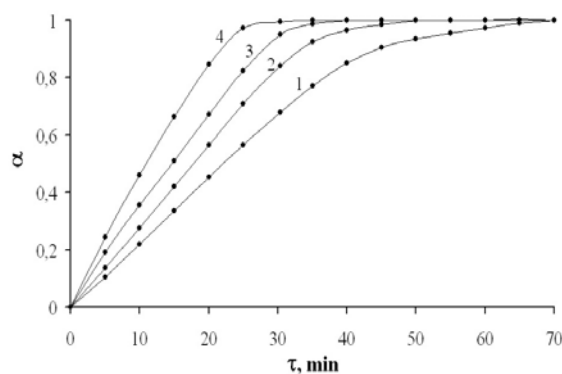


Рисунок 3. Зависимость степени превращения центра 2 пленок оксида вольфрама (VI) толщиной 70-75 нм от температуры обработки: 1) 423 К, 2) 473 К, 3) 523 К, 4) 573 К.

Для выяснения энергетического строения оксида вольфрама (VI) и причин, вызывающих наблюдаемые изменения его оптических свойств в разных спектральных областях были измерены значения КРП (таблица) между пленками оксида вольфрама (VI) и электродом сравнения из платины в условиях атмосферы ($P = 1 \cdot 10^5$ Па), высокого вакуума ($P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па) и после предварительного прогрева образцов при $T = 550$ К в течение 180 мин.

Таблица

Контактная разность потенциалов ($V_{КРП}$) между образцами WO_3 и электродом сравнения из платины при $T = 293$ К.

Образец		$V_{КРП}$, В		
		Давление, Па		
		$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}^*$
WO_3	пленка	-0,46	-0,48	-0,57

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

Видно, что значения КРП между оксидом вольфрама (VI) и электродом сравнения из платины при понижении давления в измери-

тельной ячейке и после предварительной тепловой обработки образцов в высоком вакууме возрастают. Следует отметить, что наблюдаемые изменения значений КРП после прогрева образцов необратимы только в высоком вакууме ($P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па). Последующее хранение препаратов при $T = 293$ К в течение нескольких часов в атмосферных условиях приводит к тому, что значения КРП соответствуют измеренным в условиях атмосферы. В результате исследований состава выделяющихся в процессе предварительного прогрева оксида вольфрама (VI) газов было установлено, что для образцов, подвергнутых двадцати четырех часовому хранению в высоком вакууме ($P = 1 \cdot 10^{-5}$ Па) при $T = 293$ К, основными газообразными продуктами, которые выделяются из WO_3 являются азот и вода, а после прогрева образцов в течение 3 часов газовыделение прекращается. Мы полагаем, что наблюдаемые с понижением давления в ячейке и после предварительного прогрева образцов изменения КРП связаны с десорбцией адсорбированных на поверхности образцов оксида вольфрама (VI) донорных газов [32]. На рисунке 4 приведена диаграмма энергетических зон, при построении которой использованы результаты измерений спектров поглощения и отражения, КРП до и после термической обработки наноразмерных пленок оксида вольфрама (VI) разной толщины, данные о сродстве к электрону [33].

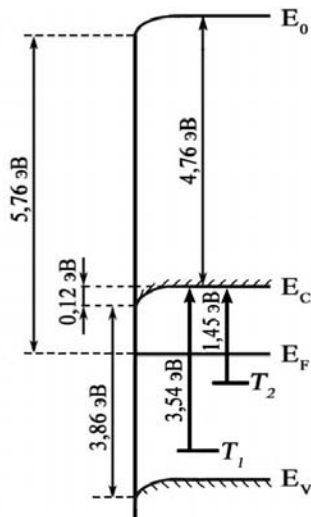


Рисунок 4. Диаграмма энергетических зон пленки оксида вольфрама (VI). E_V – уровень потолка валентной зоны, E_C – уровень дна зоны проводимости, E_F – уровень Ферми, E_0 – уровень вакуума, T_1 – центр $[(V_a)^{++} e]$, T_2 – центр $[e (V_a)^{++} e]$.

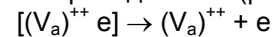
Полоса поглощения в диапазоне $\lambda = 300$ - 400 нм с максимумом при $\lambda = 350$ нм (центр T_1) в области края собственного поглощения

монокристаллов и пленок WO_3 связана со стехиометрическим недостатком кислорода и обусловлена вакансиями кислорода $[(V_a)^{++}]$ с одним захваченным электроном $[(V_a)^{++} e]$ (аналог F-центра) [10-13, 21, 22]. Этот центр, видимо, формируется в процессе приготовления пленок WO_3 различной толщины.

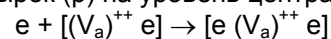
Глубина залегания $[(V_a)^{++} e]$ -центра составляет $E_F^1 = 3,54$ эВ (рис. 4). Мы полагаем, что уменьшение оптической плотности в диапазоне $\lambda = 300$ - 400 нм с максимумом при $\lambda = 350$ нм, а также увеличение оптической плотности в диапазоне $\lambda = 400$ - 1100 нм с максимумом при $\lambda = 850$ нм в процессе термической обработки пленок оксида вольфрама (VI) взаимосвязанные процессы и являются результатом преобразования центра $[(V_a)^{++} e]$.

Для того чтобы при термическом возбуждении электронной подсистемы твердого тела осуществить переход электрона с нижнего заполненного уровня на верхний незаполненный [29] 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 1 на дно зоны проводимости (рис. 4)



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



(для обеспечения этого процесса требуется энергия $E = E_{шзз} - E_F^1$, где $E_{шзз}$ – ширина запрещенной зоны оксида вольфрама (VI)). Оценим возможность осуществления указанных процессов в реальных условиях эксперимента. Фононы не моноэнергетичны. Их распределение по энергиям подчиняется уравнению Больцмана [29]. Согласно уравнению Больцмана всегда есть вероятность того, что при температурах $T = 373$ -573 К будет существовать фонон с энергией равной $E_F^1 = 3,28$ эВ или $E = 0,25$ эВ. (Для обеспечения термически активируемых переходов затраты энергии будут составлять 0,2-0,3 эВ от оптических [24]). Уравнение 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 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 –

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА (VI)

концентрация $[(V_a)^{++} e]$ - центров, ΔE – величина преодолеваемого барьера ($E_F^1 = 3,28$ эВ, $E = 0,25$ эВ), k_0 – постоянная Больцмана ($8,57 \cdot 10^{-5}$ эВ/Т), Т – температура (573 К).

Методами дифференциальной сканирующей спектроскопии, дифференциального термического анализа, электронной микроскопии и рентгеновской дифракции установлено, что область нестехиометрии $WO_{3-\gamma}$, в которой сохраняется неизменная структура оксида вольфрама (VI), очень мала и соответствует значению $\gamma = 0,02 - 0,32$ [10, 12, 13, 15, 17, 22]. Концентрация парамагнитных центров по данным ЭПР [13] составляет $\sim 10^{18}$ см⁻³. Если оценить концентрацию $[(V_a)^{++} e]$ -центров $\approx 10^{16} - 10^{18}$ см⁻³ и считать, что все анионные вакансии в оксиде вольфрама (VI) 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) скорости процессов термического возбуждения электрона с уровней $[(V_a)^{++} e]$ - центра на дно зоны проводимости и термического возбуждения электрона с потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра составят $W_1 \approx 10^1$ см⁻³·с⁻¹ и $W_2 \approx 10^{27}$ см⁻³·с⁻¹ соответственно. Отсюда следует, что при термическом возбуждении электронов с уровней $[(V_a)^{++} e]$ - центра в зону проводимости в см³ WO_3 за одну секунду переходит $\approx 10^1$ электронов – очень малое количество. Скорость процесса термического возбуждения электронов с потолка валентной зоны на уровни $[(V_a)^{++} e]$ - центра достаточно велика, чтобы обеспечить дальнейшие превращения в пленке оксида вольфрама (VI). По-видимому, широкая полоса поглощения в диапазоне с максимумом при $\lambda = 850$ нм, связана с формированием $[e (V_a)^{++} e]$ - центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований / Под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса. – М.: Мир, 2002. – 292 с.
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
3. Сергеев Г. Б. Нанохимия. – М.: КДУ, 2006. – 336 с.
4. Суздальев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
5. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
6. Халманн М. Фотохимическая фиксация диоксида углерода // Энергетические ресурсы сквозь призму фотохимии и фотокатализа. – М.: Мир, 1986. – С. 549–578.
7. Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шаплыгин И.С. Химические и физические свойства простых оксидов металлов. – М.: Наука, 1983. – 239 с.
8. Васько А.Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1977. – 172 с.
9. Гуревич Ю.Я. Твердые электролиты. – М.: Наука, 1986. – 176 с.
10. Лусис А.Р. // Оксидные электрохромные материалы. Межвуз. сб. научных трудов ЛГУ им. П. Стучки. – Рига: Изд-во ЛГУ им. П. Стучки, 1981. – 13 – 37 с.
11. Лусис А.Р., Клеперис Я.Я. // Электрохимия. – 1992. Т. 28. Вып. 10. С. 1450 – 1455.
12. Фауен Б.В., Крэнделл Р.С. Электрохромные дисплеи на основе WO_3 // Дисплеи. Под редакцией Ж. Панкова. – М.: Изд-во «Мир», 1982. – 316 с.
13. Круглов В.И., Денисов Е.П., Краевский С.А. // Оксидные электрохромные материалы. Межвуз. сб. научных трудов ЛГУ им. П. Стучки. – Рига: Изд-во ЛГУ им. П. Стучки, 1981. – 66 – 85 с.
14. Giulio M.D., Manno D. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 1998. – V. 9. – P. 317–322.
15. Габрусенко Е.В. // Электрохромизм. – Рига: Изд-во ЛГУ им. П.Стучки, 1987. – 143 с.
16. Лазарев В.Б., Красов В.Г., Шаплыгин И.С. Электропроводность окисных систем и пленочных структур. – М.: Изд-во «Наука», 1979. – 168 с.
17. Клявинь Я.К., Лагздонс Ю.Л., Лусис А.Р. // Физика и химия стеклообразующих систем. – 1976. – № 4. – С. 141–149.
18. Maosong Tong, Guorui Dai // Journal of Materials Science. – 2001. – V. 36. – P. 2535 2538.
19. Раманс Г.М. Структура и морфология аморфных пленок триоксида вольфрама и молибдена. – Рига: ЛГУ им. П.Стучки, 1987. – 143 с.
20. Перельман Ф.М., Зворыкин А.Я. Молибден и вольфрам. – М.: Изд-во «Наука», 1968. – 140с.
21. Surovoy E.P., Borisova N.V., Titov I.V. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – № 10. Приложение. – С. 338 340.
22. Суровой Э.П., Бин С.В., Борисова Н.В. // Журнал физической химии. – 2010. – Т. 84. – № 7. – С. 2120 2125.
23. Тутов Е.А., Рябцев С.В., Андрюков А.Ю. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, – № 3, – С. 38 43.
24. Суровой Э.П., Борисова Н.В. // Журнал физической химии. – 2008. – Т. 82. – № 2. – С. 2120 2125.
25. Surovoy E.P., Borisova N.V. // Journal of Physical Chemistry, 2009, V. 83, № 13, P. 2302-2307.
26. Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майсела, Р. Гленга. – М.: Советское радио, 1977. – 664 с.
27. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н. // Химическая физика. 2002. Т. 21. № 7. С. 74 – 78.
28. Суровой Э.П., И.В. Титов, Бугерко Л.Н. // Материаловедение. 2005. № 7. С. 15 – 20.
29. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. – М.: Мир, 1973. – 456 с.
30. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
31. Гуревич М.М. Фотометрия. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
32. Волькенштейн Ф.Ф. Физико - химия поверхности полупроводников. М.: Наука. 1972. 399 с.
33. Haranahali A.R., Holloway P.H. // J. Electronic Mater. 1981. V. 10. № 1. P. 141 – 172.