Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 544.164.164.032.52

Обзор

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХРОМНОГО ЭФФЕКТА В СЛОЖНЫХ ОКСИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Б.М. Хуболов¹, В.П. Подлинов²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355029, Россия, Ставрополь, ул. Кулакова, 2

boris_khubolov@rambler.ru, boris_khubolov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.259

Аннотация: Обзорно рассмотрены некоторые особенности электрохромно чувствительных монокристаллов и тонких пленок сложных оксидов переходных металлов. На основе результатов исследований, позволяющих делать выводы о конкретных моделях физического процесса, лежащего в основе электрохромного эффекта, сформулированы наиболее актуальные вопросы дальнейших исследований сложных оксидов переходных металлов для получения прикладных результатов, способных стать основой высокоэффективной технологии электрохромных устройств. Обоснована эффективность сложных оксидов переходных металлов, как более перспективного электрохромного материала.

Ключевые слова: электрохромный эффект, сложные оксиды переходных металлов, оксидная вольфрамовая бронза, монокристаллы, тонкие пленки.

Электрохромизм как оптоэлектронное явление, т.е. физическое явление, в котором взаимодействие электромагнитного излучения (в его оптическом диапазоне) связано, точнее сказать, взаимосвязано с электронной системой твердого тела, впервые исследовал Деб [1]. Пленки WO_3 , напыленные на подложку, температура которой $75^\circ C$, со скоростью 1 нм/с по данным рентгеновской дифракции были аморфны. Пленки, толщина которых была в пределах 1 мкм, окрашивались наложением электрического поля с напряженностью 10^4 В/см при комнатной температуре и обычной влажности. Помещенные в вакуумную камеру, откаченную до остаточного давления $\sim 10^{-5}$ Торр, пленки не окрашивались. И, наоборот, пленки, помещенные в более влажную атмосферу при нормальном давлении, окрашивались интенсивнее (по скорости окрашивания). Достижимая при электрическом окрашивании оптическая плотность $\Delta D \sim 0,5$. Окрашивание было обратимым при смене полярности приложенного поля. На наш взгляд, сразу после напыления пленка WO_3 является ионным проводником. Наиболее вероятными носителями заряда могут быть ионы кислорода, что связано с большим числом кислородных вакансий [2, 3]. После адсорбции паров воды проводимость пленки обусловлена протонами, которые имеют более высокую подвижность по капиллярной (жидкой) воде, чем по кристаллизационной воде [4]. Это приводит к появлению двух релаксационных процессов. Процесс старения

приводит к росту времен релаксации обоих процессов и к уменьшению приэлектродной емкости. Однако, вследствие залечивания пор, капиллярная вода постепенно переходит в объем, что приводит к росту доли кристаллизационной воды. Таким, образом, гидратация пленки WO_3 , с одной стороны, приводит к появлению протонной проводимости, а с другой – к перестройке структуры пленки и быстрому падению протонной проводимости.

Пленка, полученная Дебом, как и все электрохромные пленки, окрашивалась и оптически при облучении электромагнитным излучением из области фундаментального поглощения. Граница окрашивающего ультрафиолета была около 380 нм. Время окрашивания до оптической плотности $\Delta D \sim 0,5$ составляло $\sim 30-45$ минут. Так как, термически окисленная на воздухе до полной стехиометрии по кислороду, тонкая пленка WO_3 в дальнейшем не окрашивалась никакими методами, кроме нагрева в вакууме, который естественно сопровождался десорбцией кислорода из пленки, то Деб связывал центры окраски в пленке WO_3 также, как и мы, с вакансиями по кислороду. Считая, что механизмы оптического и электрического окрашивания идентичны, Деб связывал эти окрашивания с инжекцией электронов, но роль фотогенерированных дырок, по его мнению, была несущественна для электрохромного процесса. Им была предложена простая одномерная модель энергетических зон электрохромно чувствительной тонкой пленки WO_3 , которая могла объяснить большинство свойств центров окраски в WO_3 .

Электроны, введенные в зону проводимости или оптически, или электрически, захватываются положительными центрами локализации, в качестве которых могут быть структурные дефекты, например, вакансии кислорода. Электроны, захваченные вакансиями, будут в основном подобны F -центрам, как и в других ионных твердых телах. Деб предполагал, что возбужденное состояние F -центра локализовано ниже зоны проводимости глубже, чем на $k_B T$ (энергия фононного возбуждения, k_B – постоянная Больцмана), так как центры окраски при обычной температуре неспособны фотообесцвечиваться. Деб отвергал альтернативные модели окрашивания при поляронном поглощении или $d-d$ переходах на вольфраме. В последующем, электрохромные ячейки (ЭХЯ), используемые для научных исследований и для отработки технологий получения индикаторных или дисплейных устройств, представляли собой планарную структуру типа «сэндвич». Что касается природы электрохромного эффекта (ЭХЭ) и механизма данного эффекта, то разброс подходов к этому вопросу весьма широк. Заявления по этому вопросу чаще носили подход не обоснованный экспериментально и

теоретически, а почти декларативный.

Значителен объем исследований фотохромизма и электрохромизма в тонких пленках WO_3 , MoO_3 и V_2O_5 , выполненный в работах Колтона [5] с соавторами. Аморфные тонкие пленки перечисленных оксидов вакуумно конденсировались из вольфрамовых, молибденовых и танталовых испарителей прямого нагрева электрическим током на подложку из NESA-стекла с проводящим слоем химически нанесенного SnO_2 . Тщательная рентгенофотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) позволила Колтону сделать следующий вывод:

а) при окрашивании в тонких пленках WO_3 образуются восстановленные формы вольфрама, которые при обесцвечивании исчезают;

б) при окрашивании и образовании восстановленных форм вольфрама вблизи уровня Ферми появляется зона слабой интенсивности;

в) эта зона локализована в пределах запрещенной зоны исходного материала, т. е. WO_3 (не окрашен);

г) появление асимметрии форм линий в спектре внутренних уровней $4f$ вольфрама идёт синхронно с процессом окрашивания и образованием восстановленных форм вольфрама.

Однако Колтон подчеркнул, что механизм поглощения центрами окраски остается дискуссионным, да и природа центров окраски, атомно-микроскопическая модель электронного перехода, ответственного за электрохромное окрашивание, добавим мы. Конкурируют следующие модели механизмов электрохромного окрашивания:

- межвалентный перенос;
- поляронное поглощение, например, электронное возбуждение между W^{+5} и W^{+6} ионами;
- перенос заряда с валентной зоны материала на электронный уровень восстановленной формы, т.е. перенос заряда с валентных уровней кислорода ($O2p$) на состояния $W5d$, которые локализованы в пределах запрещенной зоны;
- межзонный перенос с заполненных зон в зоны, находящиеся в возбужденном состоянии, например $\pi^* \rightarrow \sigma^*$ поглощение в соединениях ReO_3 ;
- переходы между F и F^* –центрами в вакансиях кислородных ионов.

Колтоном предложена следующая интерпретация результатов РФЭС-исследования энергетического интервала вблизи уровня Ферми. Аморфная пленка содержит большое число кислородных вакансий [6, 7]. Электроны, поставляемые от внешнего или внутреннего источника,

заселяют дефектную зону, которая образуется вследствие опускания состояний металла, в данном случае вольфрама, в пониженное энергетическое состояние, в частности, в запрещенную зону бездефектного WO_3 из-за уменьшения потенциала Маделунга для вольфрама при образовании кислородной вакансии на одной из связей $W-O$.

Если предположить, что при электрохромном эффекте имеет место окислительно-восстановительная реакция в сочетании с химической реакцией, образующей нерастворимый окрашенный материал, то цвет окрашенного электрохромного материала может быть снят только электрохимическим способом. Аналитическая модель в этом случае более сложна, если учитывать возможные двухэлектронные и более реакции. Однако, если вновь ввести упрощение о высокой скорости электрохимической и химической реакции, то вновь можно считать скорость электрохромного процесса ограниченной вновь только процессом диффузии, фактически мы будем иметь эквивалент прямому электролитическому отложению нерастворимого вещества на электроде. По мнению Чанга [6], в этом случае поглощательную способность нерастворяющегося адсорбента следует определять в терминах плотности ионного заряда, а не в терминах ионной концентрации.

Остановимся теперь подробнее на том варианте, когда имеет место окислительно-восстановительная реакции в твердой пленке, находящейся на одном из электродов в электролите, при этом восстановление ее дает окраску в этой пленке высокой интенсивности. Так как пленка представляет собой оксид, то в первом приближении ее восстановление может быть выполнено протонами. Это тем более обоснованно, так как электрохромное окрашивание наблюдается в присутствии кислотных растворов. Чанг приводит уравнение электрохимической реакции, происходящей при этом: $mWO_3 + 2nH^+ + 2ne^- \rightarrow W_mO_{3m-n}$ (голубой цвет).

Хотя, очевидно, что протоны принимают участие в реакции, точно неясно, что происходит у электрода или внутри оксида. Такая неясность не расшифровывается моделью образования вольфрамовой бронзы при электрохромном окрашивании. Именно эта неясность требует тщательных экспериментальных и теоретических исследований процессов электронного и ионного переноса через границу WO_3 /электролит или M_xWO_3 /электролит.

Проведенные нами системные исследования межфазной границы оксидная вольфрамовая бронза/протонный электролит комплексным методом ДВАХ+ВЭХ (динамические вольтамперные характеристики и вольтэстансные характеристики) [7,8] подтвердили выводы различных авторов, значительно расширив информацию о процессах, протекающих

на атомарно-микроскопическом уровне при анодизации поверхности монокристаллов, при окрашивании и обесцвечивании электрохромных монокристаллов и аморфных тонких пленок оксидных вольфрамовых бронз.

Все рассмотренные нами модели электрохромизма в WO_3 , в том числе и аналитические, исходили из двух положений:

- электрохромное окрашивание обусловлено инжекцией протонов и электронов в электрохромный материал (ЭХМ);
- вследствие такой инжекции образуется водородно-вольфрамовая бронза, ответственная за электрохромный эффект.

Однако, модель вольфрамовой бронзы сама по себе не приводит к пониманию важности примеси и структурных дефектов, и мы полностью разделяем это мнение. По нашим данным, да и экспериментальным результатам других авторов, скорости окрашивания и достигаемая оптическая плотность отличаются порядками величин, в зависимости от режимов получения пленок оксида вольфрама и оксидной вольфрамовой бронзы. Являясь наиболее перспективным материалом для создания электрохромных устройств (ЭХУ), оксид вольфрама WO_3 , изучаемый во многих исследовательских зарубежных и отечественных центрах, малоперспективен, по нашему мнению, в силу ряда недостатков. Прежде всего, это деградация пленок WO_3 и в протонных и в апротонных электролитах, хотя и с различными механизмами деградации [9-11].

Более перспективным материалом для ЭХУ авторами, имеющими длительный опыт работы с электросинтезом оксидных вольфрамовых бронз (ОВБ), признаны именно щелочнооксидные вольфрамовые бронзы, общая формула которых M_xWO_3 , где $x \sim 0,3-0,9$ и $M = Li, Na, K, Cs, Te$ [12].

Предлагаемый механизм окрашивания ОВБ повторяет предложение для электрохромного оксида вольфрама:

- образование водородных бронз вследствие ухода натрия из поверхностных слоев $Na_{0,9}WO_3$ и внедрения протона;
- межвалентный электронный переход $W^{+6} \rightarrow W^{+5}$;
- электронный или поляронный переход внутри зоны проводимости (при высоких X) – аналог друдовского поглощения;
- электронный переход из донорных состояний в зону проводимости.

Длительное пребывание ОВБ вне поля зрения разработчиков ЭХУ связано, на наш взгляд, с трудностями технологии получения тонких пленок ОВБ. Фундаментальные работы по электрохромизму пленок вольфрамовых бронз проводились в Стэнфордском университете. Были получены тонкие пленки гексагональной калий-вольфрамовой бронзы $K_{0,3}WO_3$ термическим испарением в вакууме смеси $WO_3 - K_2CO_3$. Всесторонне

изучались их состав, структура и взаимосвязь этих параметров с условиями осаждения. Была показана перспективность ОВБ для использования в электрохромных приборах.

Позже появились и другие работы по получению вакуумной конденсации тонких пленок ОВБ.

Анализ мировой научной литературы позволяет сделать выводы по электрохромизму ОВБ и их свойствам:

1. Тонкие пленки преимущественно получают испарением в вакууме смеси $M_2CO_3 - WO_3$.

2. Возможно получение аморфных, поликристаллических и текстурированных пленок.

3. Постулируется наличие протяженных туннелей в тетрагональной и гексагональной бронзах, что может быть предпосылкой быстрого ионного транспорта в пленках бронз.

4. Наличие высокой подвижности ионов лития в смешанных бронзах $Na_xLi_yWO_3$ и $K_xLi_yWO_3$.

5. Наличие смешанной ионно-электронной проводимости у ОВБ.

6. Наличие у ОВБ высокой коррозионной стойкости в водных и кислых растворах.

7. Предполагается наличие у ОВБ общего с триоксидом вольфрама механизмом изменения окраски.

8. Полицветность (разнообразие цветных тонов) у монокристаллов в натрий-вольфрамовой бронзе (желтый – зеленый – синий – фиолетовый – красный).

9. Последовательность смены окраски в зависимости от содержания натрия в бронзе Na_xWO_3 .

Значительные ожидания в плане эффективности процессов электрохромного окрашивания связывались с гексагональными фазами материалов, в которых ионный транспорт по более просторным гексагональным каналам представлялся вполне реальным. Однако значительных успехов достигнуто не было. В тонких гексагональных пленках M_xWO_3 ионный транспорт, точнее скорости окрашивания, в значительной мере определялись условиями изготовления тонких пленок и при одинаковой структуре и геометрических параметрах могли значительно отличаться физическими свойствами, в том числе и скоростями окрашивания и обесцвечивания тонких пленок. Исследованием оксидных вольфрамовых бронз занималось ограниченное число научных центров в мире. Технологии электрохромных устройств на основе оксидных вольфрамовых бронз опирались в основном на электрохимические методы получения. Методами вакуумной конденсации

получались единичные бронзы. Перспективность ОВБ как электрохромного материала постулировались, но никак не подтверждалась экспериментальными результатами. Отсутствие прорыва в технологии электрохромных устройств, несмотря на значительное число зарегистрированных патентов, говорило о необходимости проведения системных, широких исследований электрохромного эффекта с единых позиций фундаментального подхода к этому эффекту.

Заключение

По нашему мнению, для достижения основной цели работы – разработки и освоения технологии изготовления электрохромных приборов, необходимо дальнейшее проведение научно-исследовательской работы по решению ряда задач:

1. Материаловедческих, включающих в себя поиск электрохромных слоев с согласованными физико-химическими и электрофизическими свойствами, поиск новых супериоников, изучение процессов осаждения тонких пленок электрохромных материалов.

2. Физико-химических, включающих дальнейшее изучение электрохромного эффекта, электронно-ионных процессов на межфазных границах, физики функционирования электрохромных систем.

3. Технологических, включающих в себя разработку оптимальной конструкции электрохромного устройства, разработку лабораторной технологии осаждения необходимых тонких пленок, разработку и изготовление необходимого оборудования для нанесения пленок на стеклянные субстраты, разработку оборудования для управления электрохромными приборами.

Библиографический список:

1. **Deb, S.K.** Optical and photoelectric properties and colour centers in thin films of tungsten oxide / S.K. Deb // The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. – 1973. – V. 27. – I. 4. – P. 801-822.
2. **Хуболов, Б.М.** Влияние кислородных вакансий на процессы переноса в аморфных тонких пленках сложных оксидов вольфрама / Б.М. Хуболов, В.П. Подлинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – № 9. – С. 86-90.
3. **Хуболов, Б.М.** Электрохромная эффективность аморфных тонких пленок сложного оксида вольфрама / Б.М. Хуболов, Ж.Х. Хоконова, В.П. Подлинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – № 7. – С. 86-90.
4. **Секушин, Н.А.** Влияние паров воды на диэлектрические свойства аморфных пленок / Н.А. Секушин, С.Н. Толмачев // Международная научная конференция «Тонкие пленки и наноструктуры» (Пленки-2004): Москва, 7-10 сентября 2004: материалы конференции; под ред. А.С. Сигова. – М.: Изд-во МИРЭА, 2004. – Ч. 1. – С. 185-187.
5. **Colton, R.J.** Photochromism and electromism in amorphous transition metal oxide films /

- R.J. Colton, A.M. Guzman, J.W. Rabalais // *Accounts of Chemical Research*. – 1978. – V 11. – I. 4. – P. 170-176.
6. **Chang, I.F.** Electrochemichromic systems for display applications / I.F. Chang, B.L. Gilbert, T.I. Sun // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1975. – V. 122. – I. 7. – P. 955-962.
7. **Хуболов, Б.М.** Исследование поверхностного слоя монокристаллов и аморфных тонких пленок оксидных натрий-вольфрамовых бронз методом эстанса / Б.М. Хуболов // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2004. – № 4. – С. 42-45.
8. **Хуболов, Б.М.** Структура и морфология аморфных тонких пленок оксидных натрий-вольфрамовых и калий-вольфрамовых бронз / Б.М. Хуболов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2005. – № 6. – С. 78-84.
9. **Ахкубеков, А.А.** Влияние электропереноса на эффект Киркендалла и парциальные протяженности жидких зон, возникающих при контактном плавлении в металлических системах / А.А. Ахкубеков, А.М. Багов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2010. – Т. 74. – № 8. – С. 1223-1225.
10. **Ахкубеков, А.А.** О смещении инертных меток при контактном плавлении бинарных металлических систем при наличии электропереноса / А.А. Ахкубеков, А.М. Багов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2009. – Т. 73. – № 7. – С. 961-963.
11. **Ахкубеков, А.А.** Влияние электропереноса на кристаллизацию и макроскопическое течение при контактном плавлении металлов / А.А. Ахкубеков, С.П. Савинцев, А.М. Багов // *Металлы*. – 2004. – № 4. – С. 33-36.
12. **Хуболов, Б.М.** Электрохромизм натрий-вольфрамовых бронз: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Хуболов Борис Магомедович. – Нальчик: КБГУ, 1990. – 17 с.

References:

1. **Deb, S.K.** Optical and photoelectric properties and colour centers in thin films of tungsten oxide / S.K. Deb // *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. – 1973. – V. 27. – I. 4. – P. 801-822.
2. **Khubolov, B.M.** The effect of oxygen vacancies on transport processes in amorphous thin films of complex tungsten oxides / B.M. Khubolov, V.P. Podlinov // *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*. – 2004. – № 9. – P. 86-90. (In Russian).
3. **Khubolov, B.M.** Electrochromic efficiency of amorphous thin films of complex tungsten oxide / B.M. Khubolov, Zh.Kh. Khokonova, V.P. Podlinov // *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*. – 2004. – № 7. – P. 86-90. (In Russian).
4. **Sekushin, N.A.** The effect of water vapor on the dielectric properties of amorphous films / N.A. Sekushin, S.N. Tolmachev // *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Tonkie plenki i nanostruktury» (Plenki-2004): Moskva, 7-10 sentyabrya 2004: materialy konferentsii; pod red. A.S. Sigova*. – M.: Izd-vo MIREA, 2004. – Ch. 1. – P. 185-187.
5. **Colton, R.J.** Photochromism and electromism in amorphous transition metal oxide films / R.J. Colton, A.M. Guzman, J.W. Rabalais // *Accounts of Chemical Research*. – 1978. – V 11. – I. 4. – P. 170-176.
6. **Chang, I.F.** Electrochemichromic systems for display applications / I.F. Chang, B.L. Gilbert, T.I. Sun // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1975. – V. 122. – I. 7.

– P. 955-962.

7. **Khubolov, B.M.** Investigation of the surface layer of single crystals and amorphous thin films of sodium-tungsten bronze oxide by the etch method / B.M. Khubolov // *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki.* – 2004. – № 4. – P. 42-45. (In Russian).

8. **Khubolov, B.M.** Structure and morphology of amorphous thin films of oxide sodium-tungsten and potassium-tungsten bronzes / B.M. Khubolov // *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i nejtronnye issledovaniya.* – 2005. – № 6. – P. 78-84. (In Russian).

9. **Akhkubekov, A.A.** Influence of electric transfer on the Kirkendall effect and partial lengths of liquid areas appearing upon contact melting in metallic systems / A.A. Akhkubekov, A.M. Bagov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2010. – V. 74. – I. 8. – P. 1173-1175.

10. **Akhkubekov, A.A.** On the shift of inert labels at contact melting of binary metallic systems upon electrotransfer / A.A. Akhkubekov, A.M. Bagov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2009. – V. 73. – I. 7. – P. 905-907.

11. **Akhkubekov, A.A.** Effect of electrotransfer on the solidification and macroscopic flow of metals during contact melting / A.A. Akhkubekov, S.P. Savintsev, A.M. Bagov // *Russian metallurgy (Metally).* – 2004. – V. 2004. – № 4. – P. 329-330.

12. **Khubolov, B.M.** Electrochromism of sodium-tungsten bronzes: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.07 / Khubolov Boris Magometovich. – Nal'chik: KBGU, 1990. – 17 p. (In Russian).

Review

FEATURES OF THE ELECTROCHROMIUM EFFECT IN COMPLEX TRANSITION METAL OXIDES

B.M. Khubolov¹, V.P. Podlinov²

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.259

Abstract: Some features of electrochromically sensitive single crystals and thin films of the complex transition metal oxides are reviewed. Based on the results of studies that allow us to draw conclusions about specific models of the physical process underlying the electrochromic effect, the most urgent questions of further studies of complex transition metal oxides are formulated to obtain applied results that can form the basis of highly efficient technology of electrochromic devices. The efficiency of complex transition metal oxides as a more promising electrochromic material is substantiated.

Keywords: *electrochromic effect, complex transition metal oxides, oxide tungsten bronze, monocrystals, thin films.*

Хуболов Борис Магомедович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Управления научных исследований и инновационной деятельности, заведующий лабораторией электрохромных материалов кафедры экспериментальной и теоретической физики Института физики и математики ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Подлинов Владимир Павлович – ведущий инженер научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Boris M. Khubolov – Ph. D., Leading Researcher of Management Research and Innovation Department, Head of the Laboratory of Electrochromic Materials, Department of Experimental and Theoretical Physics, Institute of Physics and Mathematics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Vladimir P. Podlinov – Leading Engineer of the Research and Education Center for Photovoltaics and Nanotechnologies, North-Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 04.09.2019; после рецензирования/revised: 14.10.2019; принята/accepted 01.11.2019.