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**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

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 журнале «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, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 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. Журнал 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, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 544.164.164.032.52

Краткое сообщение

ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НАТРИЙ - ВОЛЬФРАМОВЫХ БРОНЗ

Б.М. Хуболов

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

*360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
boris_khubolov@rambler.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.213

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы получения тонких пленок натрий-вольфрамовых бронз кубической структуры методом электрокристаллизации. Приведены основные параметры полученных пленок. Сняты спектры отражения пленок для неокрашенных и окрашенных пленок. Исследование приповерхностного слоя монокристаллов натрий-вольфрамовых бронз методами протонографии и ядерных реакций показало их высокое структурное совершенство. Анодная и катодная поляризации монокристаллов приводят к изменению структуры их приповерхностного слоя. Обоеднение по натрию приповерхностного слоя присутствует и при катодной и при анодной поляризации, и глубина обоеднения растет с ростом времени поляризации величины напряжения. Электронографией исследованы тонкие пленки натрий-вольфрамовых бронз, установлена аморфная структура свеженапыленных пленок для всех температур подложки. Отжиг электронным лучом приводит к кристаллизации пленок.

Ключевые слова: натрий-вольфрамовая бронза, электрокристаллизация, тонкая пленка, монокристалл, спектры отражения, электрохромный эффект, эдектрохромный индикатор.

1. Введение

Поиск новых неорганических материалов различной структурной упорядоченности, изменяющих оптические свойства за счет воздействия электрического поля (электрохромный эффект) на их электронную подсистему, является задачей актуальной для многих научных и технических приложений. Среди веществ, которым свойственен электрохромный эффект наиболее изученными являются тонкие пленки оксидов переходных металлов. Наличие в них деградационных процессов различной природы поставило перед исследователями задачу поиска новых материалов с улучшенными параметрами. Натрий-вольфрамовые бронзы, обладая ярко выраженным электрохромным эффектом и высокой коррозионной устойчивостью в агрессивных средах, могут претендовать на роль материала, в котором процессы деградации будут существенно подавлены.

Натрий – вольфрамовые бронзы являются первым объектом, на которых был открыт целый класс оксидных бронз. Разные авторы получили их различными способами, которые являются весьма трудоемкими. В последние десятилетия для этих целей широко используют электрохромический метод, который как показали результаты

многочисленных исследований, дает возможность варьирования условий и режимов электролиза, получать высокочистые, идентичные по объемному составу и структуре бронзы. Он является быстрым, простым, удобным и намного более дешевым в сравнения с другими методами синтеза бронз. Анализ литературы показал, что пик исследований оксидных вольфрамовых бронз и электрохромного эффекта в них приходился на 60-80 годы прошлого столетия. В последние два десятилетия резко сократилось количество работ в этом направлении.

Целью настоящей работы является разработка технологии получения тонких пленок натрий-вольфрамовых бронз методом электрокристаллизации, которые могут быть использованы при создании полицветных электрохромных устройств открытого типа, работающие на отражении. Тонкие пленки, получаемые электрокристаллизацией могут быть нанесены на различные изделия в виде защитных покрытий, которые работают в агрессивных средах. В виду их высокой коррозионной стойкости срок службы изделий может значительно увеличен.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Первые работы, в которых систематически изучали влияние состава поливольфраматного расплава, температуры и плотности продуктов выполнены коллективом авторов [1, 2]. В расплавах вольрамата натрия они меняли содержание триоксида вольфрама от 10 до 70 мол.%, и электролиз при плотности тока $0,005-0,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ вели с использованием золотых, платиновых, вольфрамовых и никелевых электродов. Температурный интервал в экспериментах составлял $750-1000^\circ\text{C}$. Из этих работ видно, что основными продуктами электролиза являются: вольфрам, диоксид вольфрама и натрий-вольфрамовые бронзы различной структуры (кубической, тетрагональной) и габитуса (кубического с огранкой 100 и ромбодекаэдрического с огранкой 110). Вольфрам и диоксид вольфрама выделены при низких содержаниях триоксида вольфрама. Область бронз начинается с 10 мол.% WO_3 (золотисто-желтые кубы) и ограничивается 70 мол.% WO_3 (мелкокристаллический осадок черного цвета). Содержание натрия в бронзе триоксида максимально при минимальном количестве натрия вольфрама в расплаве вольфрамата натрия и наоборот. Анализ литературы [3, 4] показывает, что оксидные вольфрамовые бронзы являются перспективными, с точки зрения физико-химических и оптических характеристик, материалов для электрохромных устройств взамен широко изучаемого триоксида вольфрама.

Электрохимическим методом мы синтезировали монокристаллы оксидной натрий-вольфрамовой бронзы кубической структуры. Анодная обработка монокристаллов приводит к существенным изменениям

физических характеристик поверхности образца. В результате катодной поляризации происходит окрашивание анодированных образцов бронзы. Учитывая, что не обработанные образцы не изменяют окраски, очевидно, что электрохромный процесс связан с физико-химическими свойствами поверхностного слоя, сформированного в результате электрохимической обработки бронзы.

Для получения информации о толщине окрашивающего слоя мы использовали метод, основанный на каналировании [5]. В результате измерений получено, что после поляризации как в кислой, так и щелочной средах в течение 5 минут, в катодном и анодном режимах толщина поверхностного слоя равна $0,3 \cdot 10^{-8}$ м. При увеличении времени поляризации – катодной 24 минут, анодной – до 94 минут, толщина поверхностного слоя увеличивается до $2,7 \cdot 10^{-8}$ м.

Нами также были получены тонкие пленки натрий – вольфрамовых бронз электровакуумным напылением на установке УВН – 71М. с вращающейся каруселью, куда помещали 25 стеклянных подложек диаметром 2,54 см. Методами электронографии мы исследовали структуру и морфологию конденсированных в среднем вакууме, полученных нами тонких пленок [6]. Исследование кристаллографической структуры тонких пленок электронографией позволяет лучше понять их объемные и поверхностные свойства, что важно при создании элементной базы оптоэлектроники.

В этой связи, нами была разработана лабораторная технология получения тонких пленок оксидных натрий-вольфрамовых бронз электрокристаллизацией с требуемыми электрохромными свойствами. Они могут быть использованы в качестве основного элемента электрохромного индикатора открытого типа, функционирующего в режиме отражения. Метод электрокристаллизации используется не только при получении тонких пленок натрий-вольфрамовых бронз, но и при исследовании двойных металлических систем при контактном плавлении [7, 8]

Тонкие пленки натрий-вольфрамовых бронз получали на стеклянных и металлических подложках. Электролиты готовили из исходных химических веществ – вольфрамата натрия и триоксида вольфрама. ВольфраMAT натрия – белое кристаллическое вещество. Температура его плавления равна 968 К. Для работы использовали вольфраMAT натрия марки «х.ч.», предварительно обезвоженный при температуре 673 К в течение двух часов и переплавленный. Триоксид вольфрама – желто-зеленый мелкозернистый порошок. Температура его плавления составляет 1713 К. В работе применяли триоксид вольфрама марки «х.ч.», предварительно прокаленный при 1073 К в течение четырех часов. Рабочие составы готовили, руководствуясь данными диаграмм состояния изучаемых многокомпонентных систем [9]. Для

получения электрохромной композиции электролиз проводили в тиглях из кварца или карбида кремния в атмосфере воздуха, помещенных в контейнер из электротехнической керамики 22ХС (см. рис. 1). Контейнер опускали в жаростойкий нихромовый блок, находящийся в шахтной печи. Температуру в течение всего эксперимента поддерживали равной 1000 К при помощи автоматического потенциометра КВПТ-503 с точностью ± 280 К. Кроме того, температуру расплава в самой ячейке дополнительно контролировали потенциометром ПП-63 с использованием платина – платинородиевой термопары. Для нанесения тонких пленок на стеклянные подложки предварительно режимы их получения отрабатывали на монокристаллических образцах из металлического вольфрама. Исходным материалом для приготовления электродов служили монокристаллы вольфрама, полученные электронно-лучевой зонной плавкой. Материал был высокой чистоты и суммарное содержание примесей не превышало 10^{-3} масс.%. Из монокристаллов электроискровым способом вырезали пластины толщиной 2 мм и площадью 1 см^2 . После резки образцы шлифовали на наждачной бумаге с бензолом для удаления следов резки. После такой предварительной обработки подложки подвергали электрохимической полировке для удаления поверхностного деформированного слоя в водном растворе лимоннокислого натрия при следующих условиях: $U = 8 \div 10 \text{ В}$, $i = 3 \div 5 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$, $T = 293 \div 313 \text{ К}$. Время полировки выбирали таким образом, чтобы снять поверхностный слой на глубину порядка 200 мкм. Для получения гладкой поверхности интенсивно перемешивали электролит. Первоначально пленки вольфрамовой бронзы пытались получить в режиме катодного осаждения при плотностях тока $5 \div 25 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$. В течение $10 \div 15$ минут на вольфрамовых подложках получались покрытия из натрий-вольфрамовой бронзы состава $\text{Na}_{0,9}\text{WO}_3$ (состав расплава $0,8\text{NaWO}_4 - 0,2\text{WO}_3$) толщиной в несколько сот микрон. Покрытия несплошные, крупнокристаллические с включениями электролита. Затем, пленки бронзы получали в режиме анодного растворения вольфрама при плотностях тока $0,8 \div 1,0 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$. Время пропускания тока через электролит составляло $1 \div 10$ секунд. В зависимости от времени электролиза получали пленки различной толщины (от 1 до 10 мкм).

Получение пленок на стеклянных подложках с напыленным вольфрамом проводили в режиме анодного растворения напыленного вольфрама при условиях, найденных для подложек из монокристаллического вольфрама. Осаждение проводили при кратковременном контакте подложки с поверхностью расплава в потенциостатических условиях электролиза с помощью механизма,

показанного на рис. 2. Условия осаждения приведены в Таблицах 1 и 2.

Рис.1. Схема установки для электрохимического синтеза бронз: 1 – источник постоянного напряжения, 2 – шахтная печь, 3 – нихромовый блок, 4 – керамический контейнер, 5 – источник постоянного тока, 6 – анод, 7 – кварцевый тигель, 8 – расплав, 9 – катод, 10 – термопара.

Рис. 2. Схема приспособления для электрохимического получения пленок бронз: 1 – печь, 2 – расплав, 3 – анод, 4 – катод, 5 – усилитель, 6 – реле.

Таким образом, электрохимическим способом можно получать тонкие пленки натрий-вольфрамовой бронзы различной толщины, кубической структуры. Они обладают высокой коррозионной стойкостью и хорошими электрохромными характеристиками. В процессе циклирования в кислотном электролите, при развертке потенциала, при ($-0,1$ В) поверхность пленки приобретает зеленый цвет, при ($-0,2$ В) – синий, при ($-0,4$ В) – красный. Изменение полярности восстанавливает исходный желтый цвет. Состав пленок вольфрамовых бронз определяли на дифрактометре «Дрон-2» и Cu-K_α излучении при напряжении на рентгеновской трубке 35 кВ и тока 20 мА. Предел измерения 1000 имп./с, постоянная времени 0,5 с, окно 20, порог 20, усиление 64. Скорость вращения счетчика составляет 4 град./мин. Щели: I – 0,5 мм, II – 0,6 мм, III – 0,5 мм. По

дифрактограмме устанавливали тип структуры и параметры решетки соединения. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Зависимость состава пленок натрий-вольфрамовых бронз Na_xWO_3 от потенциала осаждения ($T = 1000$ K).

Состав расплава, мол. %	Время осаждения, сек.	Потенциал осаждения, В	Структура	Параметры решетки, Å	x
$0,8NaWO_4 - 0,2WO_3$	0,1	0,5	куб.	3,847	0,76
		0,45	куб.	3,841	0,69
		0,4	куб.	3,835	0,62

Таблица 2. Зависимость толщины пленок $Na_{0,76}WO_3$ от времени осаждения ($T = 1000$ K).

Состав расплава, мол. %	Потенциал осаждения, В	Время осаждения, сек	Толщина, мкм
$0,8NaWO_4 - 0,2WO_3$	0,5	0,01	$10^{-3} \div 10^{-2}$
	0,5	0,1	0,15
	0,5	2	1,5
	0,5	5	4

Таблица 3. Характеристики электрохимически полученных пленок натрий-вольфрамовых бронз состава $Na_{0,76}WO_3$.

Характеристики пленки	Пленка $Na_{0,76}WO_3$
Время окрашивания, сек.	0,04
Время обесцвечивания, сек	0,04
Число переключений	10^6

Рис. 3. Спектры отражения пленок натрий вольфрамовых бронз: 1 –неокрашенная, 2 – окрашенная.

Оптические свойства пленок бронз определяли на спектрофотометре СФ-26. Спектры отражения пленок приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, при катодной поляризации пленок в кислотном электролите в них возникает широкая несимметричная полоса в видимой и ближней ИК-области спектра.

Для измерения скорости окрашивания – обесцвечивания и числа переключений использовали жидкие электролиты. В Таблице 3 приведены эти данные.

3. Заключение

Таким образом, электрохимический метод оказался пригодным для нанесения пленок бронз на стеклянные и металлические подложки. Эти слои могут быть использованы при создании полицветных электрохромных индикаторов открытого типа, работающие на отражение. Практическое воплощение, проведенных нами исследований, получили в разработанной лабораторной технологии изготовления электрохромных ослабителей света «триплексного» типа с использованием полимерного протонного электролита, для передающих телевизионных трубок с зарядовой связью. В дальнейшем будут исследованы полученные электрокристаллизацией тонкие пленки натрий-вольфрамовых бронз электрофизическими и электрохимическими методами.

Библиографический список:

1. **Барабошкин, А.Н.** Изучение состава и структуры катодных осадков при электролизе расплавленных смесей $Na_2WO_4 - WO_3$ / А.Н. Барабошкин, К.П. Тарасова, В.А. Назаров, З.С. Мартемьянова // Труды Института электрохимии УНЦ АН СССР. – 1973. – Вып. 19. – С. 44-48.
2. **Барабошкин, А.Н.** Катодные процессы при электролизе вольфраматных расплавов / А.Н. Барабошкин, К.П. Тарасова, В.А. Назаров // В кн: Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. – С. 38-41.
3. **Дробашева, Т.И.** Нестехиометрия и электрохромизм оксидов и многощелочных бронз вольфрама / Т.И. Дробашева, С.Б. Расторопов // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 1 (28). – Ст. № 21. – 8 с.
4. **Дробашева, Т.И.** Электрофизические свойства порошков многощелочных оксидных бронз вольфрама / Т.И. Дробашева, С.Б. Расторопов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2 (41). – Ст. № 6. – 13 с.
5. **Хуболов, Б.М.** Исследование приповерхностного слоя монокристаллов натрий-вольфрамовых бронз методами протонографии и ядерных реакций / Б.М. Хуболов, В.Я. Арбузов // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. Серия: физические науки. Нальчик: КБГУ. – 2002. – № 7. – С. 23-25.
6. **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.
7. **Ахкубеков, А.А.** Изотермическая электрокристаллизация жидкой зоны, полученной при контактном плавлении двойной системы / А.А. Ахкубеков, С.П. Савинцев, А.М. Багов // Металлы. – 2004. – № 6. – С. 44-49.
8. **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.

9. **Мохосоев, М.В.** Диаграммы состояний молибдатных и вольфраматных систем / М.В. Мохоосев, Ф.П. Алексеев, В.И. Луцик. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. – 1978. – 320 с.

References:

1. **Baraboshkin, A.N.** Izuchenie sostava i struktury katodnykh osadkov pri ehlektrolize rasplavlennykh smesei $Na_2WO_4-WO_3$ [Study of the composition and structure of cathode deposits during the electrolysis of molten mixtures $Na_2WO_4-WO_3$] / A.N. Baraboshkin, K.P. Tarasova, B.A. Nazarov, Z.S. Martem'yanova // Труды Института электрохимии УНТс АН СССР. – 1973. – Т. 19. – С. 44-48. (In Russian).

2. **Baraboshkin, A.N.** Katodnye protsessy pri ehlektrolize vol'framatnykh rasplavov [Cathodic processes in the electrolysis of tungstate melts] / A.N. Baraboshkin, K.P. Tarasova, B.A. Nazarov // В кн: Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов. – Свердловск: УНТс АН СССР, 1973. – С. 38-41. (In Russian).

3. **Drobasheva, T.I.** Nestekhiometriya i ehlektrokromizm oksidov i mnogoshchelochnykh bronz vol'frama [Nonstoichiometry and electrochromism of oxides and polyalkaline tungsten bronzes] / T.I. Drobasheva, S.B. Rastoropov // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 1 (28). – Стр. № 21. – 8 с. (In Russian).

4. **Drobasheva, T.I.** Ehlektrofizicheskie svoystva poroshkov mnogoshchelochnykh oksidnykh bronz vol'frama [Electrophysical properties of tungsten oxide bronze powders] / T.I. Drobasheva, S.B. Rastoropov // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2 (41). – Стр. № 6. – 13 с. (In Russian).

5. **Khubolov, B.M.** Issledovanie pripoverykhnostnogo sloya monokristallov natrii-vol'framovykh bronz metodami protonografii i yadernykh reaktsii [Investigation of the near-surface layer of sodium-tungsten bronze single crystals by protonography and nuclear reactions] / B.M. Khubolov, V.Ya. Arbuzov // Vestnik Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: fizicheskie nauki. Nal'chik: KBGU. – 2002. – № 7. – С. 23-25. (In Russian).

6. **Khubolov, B.M.** Struktura i morfologiya amorfnykh tonkikh plenok oksidnykh natrii-vol'framovykh i kalii-vol'framovykh bronz [Structure and morphology of amorphous thin films of oxide sodium-tungsten and potassium-tungsten bronzes] / B.M. Khubolov // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2005. – № 6. – С. 78-84. (In Russian).

7. **Akhkubekov, A.A.** Izotermicheskaya ehlektrokristallizatsiya zhidkoi zony, poluchennoi pri kontaktnom plavlenii dvoimoi sistema [Isothermal electrocrystallization of the liquid zone obtained by contact melting of the binary system] / A.A. Akhkubekov, S.P. Savintsev, A.M. Bagov // Russian metallurgy (Metally). – 2004. – № 6. – С. 44-49. (In Russian).

8. **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. – T. 8. – С. 1173-1175. DOI: 10.3103/S1062873810080411.

9. **Mokhosoev, M.V.** Diagrammy sostoyanii molibdatnykh i vol'framatnykh sistem [State diagrams of molybdate and tungstate systems] / M.V. Mokhosoev, F.P. Alekseev, V.I. Lutsik. – Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie. – 1978. – 320 p. (In Russian).

ELECTRIC CRYSTALLIZATION OF THIN FILMS OF SODIUM - TUNGSTEN BRONZE

B.M. Khubolov

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.213

Abstract: The paper considers the problems of obtaining thin films of sodium-tungsten bronzes of a cubic structure by the method of electrocrystallization. The main parameters of the obtained films are presented. The reflection spectra of the films were recorded for uncolored and colored films. Investigation of the near-surface layer of sodium-tungsten bronze single crystals by protonography and nuclear reactions showed their high structural perfection. The anodic and cathodic polarizations of single crystals lead to a change in the structure of their surface layer. Depletion in sodium of the near-surface layer is present at both cathodic and anodic polarization, and the depletion depth increases with increasing polarization time of the voltage value. Thin films of sodium-tungsten bronzes have been investigated by electron diffraction, and the amorphous structure of freshly deposited films has been established for all substrate temperatures. Annealing with an electron beam leads to crystallization of the films.

Keywords: *sodium-tungsten bronze, electrocrystallization, thin film, single crystal, reflection spectra, electrochromic effect, electrochromic indicator.*

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»

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

Поступила в редакцию/received: 04.09.2020; после рецензирования/revise: 04.10.2020; принята/accepted 11.10.2020.