

Поверхностно-ионизационные свойства монокристаллов и поликристаллов оксидных бронз щелочного металла

Д. В. Капустин, А. А. Буш, А. К. Захаров, В. И. Капустин

Исследовано влияние структуры оксидных бронз щелочного металла, их химического состава, взаимодействия бронз с конструкционными материалами приборов на эффективность поверхностной ионизации тринитротолуола (ТНТ) и гексогена. Рассмотрены натрий-ванадиевые оксидные бронзы $\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ в поли- и монокристаллическом состоянии, а также поликристаллы бронз сложного состава $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$ и $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$, где $x = 0; 1; 3; 5\%$.

Ключевые слова: нитросоединения, оксидные бронзы щелочного металла, поли- и монокристаллические материалы, поверхностная ионизация.

This article presents the results of an investigation of the influence of the structure of an alkali metal oxide bronze and its physicochemical interaction with construction materials in devices on the efficiency of the surface ionization of TNT and RDX. The experiments were performed with sodium–vanadium oxide bronze compositions – poly- and single-crystalline $\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ and poly-crystalline $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$ and $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$, where $x = 0; 1; 3; 5\%$.

Key words: nitro-compounds, alkali metal oxide bronze, poly- and mono-crystalline materials, surface ionization.

Введение

Селективное детектирование и идентификация органических соединений на основе азота, в частности нитросоединений, является важной научной задачей в области физической и аналитической химии, биофизики, а также важной практической задачей при решении досмотровых задач при поиске взрывчатых веществ. Традиционно для указанных целей применяют методы масс-спектрометрии, газовой и жидкостной хроматографии, дрейф-спектрометрии [1 – 3]. При этом для ионизации органических нитросоединений на входе масс-спектрометров и дрейф-спектрометров или на выходе газовых хроматографов обычно используют радиоизотопные источники ионизации, коронный разряд или лазерное излучение [3].

Ранее в литературе было показано, что в интервале температур 400 – 600 °С в условиях воздуха атмосферного давления на поверхности поликристалла [4] и монокристалла [5] оксидной бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ происходит ионизация нитросое-

динений, причем данное физическое явление может быть использовано для создания приборов нового типа — поверхностно-ионизационных газоанализаторов взрывчатых веществ. В указанных работах таблетки из оксидной бронзы паяли в корпус термоэммиттеров, выполненный из молибденового сплава, медно-серебряным припоем.

Эффективность поверхностной ионизации типичного представителя нитросоединений — ТНТ на поликристалле бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ при температуре 420 °С достигала 0,24 Кл/моль [4] при значении энергии активации ионизации 0,90 эВ, однако указанные параметры отличались крайней нестабильностью, а долговечность термоэммиттера не превышала нескольких часов. В результате значение энергии активации поверхностной ионизации ТНТ возрастало до 4,9 эВ, а эффективность ионизации падала до $10^{-4} - 10^{-5}$ Кл/моль. Эффективность ионизации ТНТ на поверхности монокристалла оксидной бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ составляла 0,07 Кл/моль при температуре 500 °С [5], при этом

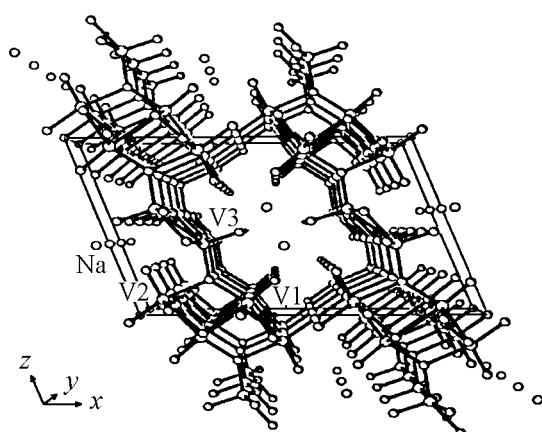
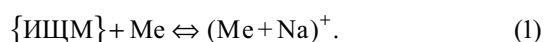


Рис. 1. Пространственная кристаллическая структура оксидной бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ (β -фазы) [6, 7].

долговечность такого материала не превышала 10–15 ч.

Оксидные бронзы щелочного металла имеют моноклинную кристаллическую решетку, в структуре которой формируются сквозные каналы, как показано на рис. 1. При этом в каждой кристаллической ячейке ионы натрия занимают одно из трех возможных положений [6, 7]. Это обеспечивает эффективную диффузию натрия из объема кристалла на его поверхность, образование на поверхности бронзы активных центров на основе ионов щелочного металла {ИЩМ} и ионизацию нитросоединений по реакции [4, 5]:



Величина эффективности ионизации $Y(T) = QM/m$ молекул органического соединения на поверхности оксидной бронзы может быть представлена в виде соотношения [4, 5]:

$$Y(T) = \frac{A}{T^{5/2}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{акт}}}{kT}\right), \quad (2)$$

где T — температура, M — молекулярная масса органического вещества, Q — электрический заряд, прошедший в цепи коллектора ионов при подаче на вход прибора пробы органического вещества массой m , k — постоянная Больцмана, $\Delta E_{\text{акт}}$ — величина энергии активации поверхностной ионизации молекул органического вещества, A — константа, пропорциональная поверхностной концентрации центров ионизации органических молекул. Входящие в соотношение (2) величины $\Delta E_{\text{акт}}$ и A зависят от материала, на котором происходит поверхностная ионизация, а величина $\Delta E_{\text{акт}}$ — еще и от типа органических молекул.

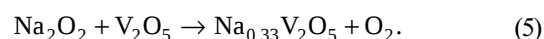
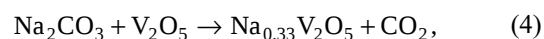
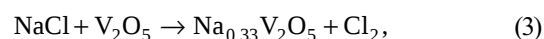
Очевидно, что процессы диффузии натрия в объеме оксидной бронзы зависят от наличия

примесей в составе бронзы, а особенности поведения активных центров на поверхности бронзы зависят от типа и концентрации поверхностных ионов натрия и ионов примесных атомов и от кристаллографической ориентации поверхности.

Цель данной работы — исследование влияния технологии изготовления оксидных бронз, структуры и состава оксидных бронз на поверхностную ионизацию типичных представителей класса нитросоединений — ТНТ и гексогена.

Приготовление экспериментальных образцов

Были исследованы три типа технологических процессов получения исходного поликристаллического порошка оксидной бронзы — по реакциям:



Проведенные рентгенофазовые исследования продуктов синтеза показали, что в продуктах реакций (3) и (4) присутствуют следы вторых фаз на основе хлоридов и карбидов ванадия. Поэтому для синтеза исходных порошков оксидных бронз и для выращивания монокристаллов бронз исходное сырье синтезировали по реакции (5).

Образцы на основе поликристаллов оксидной бронзы в виде таблеток диаметром 7 мм и толщиной 1,5 мм получали прессованием таблеток в пресс-форме и последующим спеканием при температуре 650 °С на воздухе. Монокристаллы оксидной ванадиевой бронзы натрия были выращены методом Бриджмена в кварцевых ампулах с внутренним диаметром 7 мм с использованием специально сконструированной установки, имеющей две зоны с заданными распределениями температуры. Полученные монокристаллы имели осевую ориентацию по направлению [020]. Экспериментальные образцы для дальнейших исследований (диаметром 7 мм, толщиной 1,5 мм) вырезали алмазным диском, после чего поверхность образцов шлифовали и полировали на алмазной сетке. На рис. 2 приведена рентгенограмма, снятая с поверхности образца состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$, а на рис. 3 — микроструктура поверхности поликристалла и монокристалла оксидной бронзы. При снятии рентгенограмм порошок германий наносили на поверхность образцов бронзы в качестве реперного вещества, что позволяло точно определять кристаллографические параметры бронзы. Пики германия на рентгенограмме соответствуют углам 27,30°; 45,32°; 53,70°; 66,04°; 72,82°;

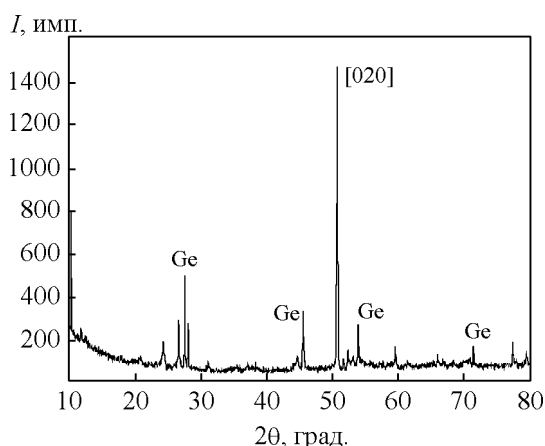


Рис. 2. Рентгенограмма с поверхности образца на основе монокристалла $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$, выращенного из порошка по реакции (5).

$83,69^\circ$. Полученные монокристаллы бронзы имели блочную структуру с некоторым количеством пор, что обусловлено высокой вязкостью расплава бронзы, затрудняющей выход пузырьков воздуха при кристаллизации бронзы. Однако поверхность всех блоков соответствовала кристаллографической плоскости (020).

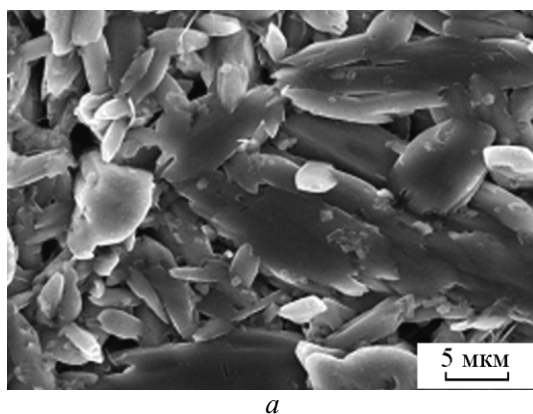
Методика активирования образцов оксидной бронзы заключалась в нескольких прогревах с постоянной скоростью нагрева до температуры 610°C и выдержке при данной температуре в течение 5 – 10 мин. Фоновый ток с поверхности оксидной бронзы в результате активирования сначала возрастал, а затем стабилизировался.

В [5] таблетки из поликристалла оксидной бронзы паяли в корпус термоэмиттера ионов из молибденового сплава припоем марки ПСр40 на основе серебра при температуре 630°C . В процессе активирования оксидной бронзы и при последующем измерении ее поверхностно-ионизационных свойств

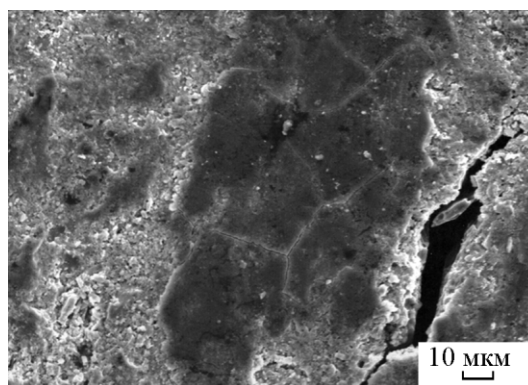
в условиях воздуха атмосферного давления температура термоэмиттера достигала $600 - 610^\circ\text{C}$. При этом было возможно взаимодействие оксида молибдена, образующегося при окислении материала корпуса на воздухе, с исходной оксидной бронзой с образованием второй фазы типа $\text{Na}_{0,33}\text{V}_{2-x}\text{Mo}_x\text{O}_5$. Возможно также внедрение атомов серебра или меди в решетку оксидной бронзы с образованием бронзы переменного состава типа $\text{Na}_{0,33-y}\text{Ag}_y\text{V}_2\text{O}_5$ или $\text{Na}_{0,33-y}\text{Cu}_y\text{V}_2\text{O}_5$. Отметим, что существование серебро-ванадиевых и медь-ванадиевых бронз с кристаллической структурой, близкой к структуре натрий-ванадиевых бронз, известно из [8, 9]. Кроме того, известно, что в припой марки ПСр40, помимо серебра (40%) и меди (17%), входят цинк (17%) и кадмий (26%). При этом оксиды цинка имеют заметную летучесть уже при температуре выше 200°C . Поэтому негативное влияние данного припоя на свойства бронз может быть связано и с “уносом” кислорода из оксидной бронзы оксидом цинка.

Все три указанных выше процесса могут приводить к снижению подвижности ионов натрия в кристаллической решетке бронзы, а также к изменению свойств активных центров ионизации нитро-соединений на поверхности оксидной бронзы. Соответственно, указанные процессы будут влиять и на стабильность и долговечность поверхностно-ионизационных свойств оксидной бронзы щелочного металла

Для устранения возможного взаимодействия оксидных бронз с материалом корпуса термоэмиттера и припоем в данной работе в корпус из молибденового сплава предварительно впаивали чашечку из никелевой фольги толщиной 0,1 мм с внутренним диаметром 7 мм. Таблетки из бронзы закрепляли в чашечке диффузионной пайкой с использованием никелевой пасты, причем на поверхность таблеток методом магнетронного



а



б

Рис. 3. Микроструктура поверхности поликристалла (а) и монокристалла (б) оксидной бронзы.

напыления предварительно наносили слой никеля толщиной 3–5 мкм.

Результаты исследований

Монокристаллы и поликристалл простых оксидных бронз

Область β -фазы натрий-ванадиевой бронзы типа $\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ существует при концентрации натрия $x = 0,22 - 0,40$, как следует из диаграммы состояния [6]. При значении $x = 0,28$ линии ликвидуса и солидуса сходятся, а при $x = 0,33$ расстояние между ними по шкале температуры составляет около 10 °С. В связи с этим нами были исследованы поверхностно-ионизационные свойства монокристаллов составов $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$ и $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ с ориентацией поверхности, совпадающей с плоскостью (020) монокристаллов. Для сравнения были исследованы параметры поверхностной ионизации поликристалла состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$, при этом была устранена возможность взаимодействия оксидных бронз с материалом корпуса термоэммиттера и припоем. В качестве тестового органического нитросоединений был выбран ТНТ, значения параметров поверхностной ионизации которого представляет большой научный и практический интерес.

При исследовании поверхностной ионизации ТНТ его спиртовой раствор с концентрацией ТНТ 2 мг/мл наносили на платиновую спираль, спираль вводили во входной канал прибора, нагревали подачей импульса электрического тока величиной 1 А и регистрировали зависимость тока коллектора от времени. Для приготовления раствора ТНТ использовали абсолютный спирт, содержание воды в котором не превышало 0,2%, а примесей — не более $10^{-3} - 10^{-4} \%$ в зависимости от типа примеси. Калиб-

ровка спирали показала, что за счет сил поверхностного натяжения на поверхности спирали после ее погружения в раствор остается 1 мкл раствора. По величине площади под кривой импульса зависимости тока коллектора от времени нагрева находили величину заряда Q , прошедшего в цепи коллектора. Эффективность поверхностной ионизации Y , Кл/моль, определяли по соотношению $Y = QM/m$, где m — масса введенного ТНТ, равная в нашем случае $2 \cdot 10^{-6}$ г, $M = 227$ — молекулярная масса ТНТ. Величину энергии активации поверхностной ионизации находили, обрабатывая экспериментальные данные в соответствии с уравнением (2) в координатах $\lg YT^{5/2} - 5040/T$. Величина тангенса угла наклона прямых участков полученных зависимостей равна значению энергии активации поверхностной ионизации, выраженной в эВ, а постоянное слагаемое в данных зависимостях равно логарифму предэкспоненциального множителя A в соотношении (2).

На рис. 4а приведена температурная зависимость эффективности ионизации ТНТ на поверхности монокристалла оксидной бронзы состава $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$, а на рис. 4б — эта же зависимость в координатах $\lg YT^{5/2} - 5040/T$. Экспериментальные результаты для всех трех исследованных бронз были получены после кратковременного прогрева (активирования) бронз до температуры 505 °С и оставались стабильными после последующих многократных прогревов образцов. В табл. 1 приведены сводные результаты исследования поверхностной ионизации ТНТ на поликристалле и монокристаллах оксидной бронзы.

Таким образом, устранение взаимодействия поликристалла оксидной бронзы с материалом термоэммиттера ионов и припоем повышает эффективность ионизации ТНТ при температуре 500 °С на поверхности бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ с 0,07 до 0,6 Кл/моль. Для монокристалла оксидной бронзы

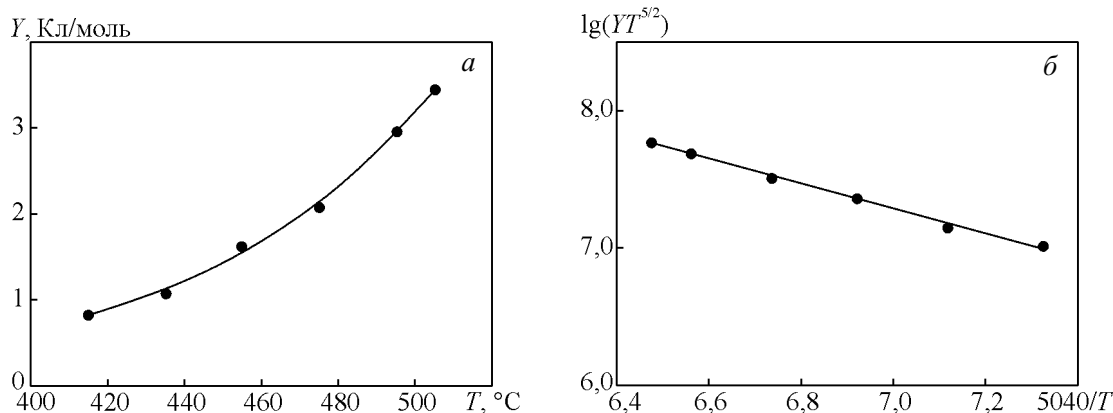


Рис. 4. Температурная зависимость эффективности ионизации ТНТ на поверхности монокристалла оксидной бронзы состава $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$ (а) то же в координатах $\lg YT^{5/2} - 5040/T$ (б).

Таблица 1

Параметры ионизации ТНТ на поверхности натрия – ванадиевых бронз

Параметры ионизации	Наличие/отсутствие взаимодействия бронзы с материалом корпуса термоэммиттера и припоем			
	Наличие взаимодействия		Отсутствие взаимодействия	
	Монокристалл по работе [5]	Поликристалл	Монокристалл	
	$\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$	$\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$
$\Delta E_{\text{акт}}$, эВ	1,16	1,32	0,97	0,90
$\lg A$, отн. ед.	13,7	15,6	13,7	13,6
Y , Кл/моль, при 500 °С	0,07	0,6	1,8	3,0

состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$ эффективность поверхностной ионизации ТНТ при температуре 500 °С составляет 1,8 Кл/моль, а для монокристалла бронзы состава $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$ она достигает 3,0 Кл/моль. Значения параметров поверхностной ионизации поликристалла и монокристаллов оксидной бронзы при отсутствии взаимодействия бронзы с материалом корпуса термоэммиттера и припоем остаются стабильными в течение длительного времени прогрева.

Поликристаллы сложных оксидных бронз

В соединениях типа натрия-ванадиевых оксидных бронз ванадий находится частично в пятивалентном состоянии и частично в четырехвалентном состоянии [6]. Поэтому были проведены исследования влияния легирования оксидной бронзы оксидом металла, имеющего валентность, отличающуюся от пяти (оксидом молибдена), для поликристаллов бронз двух составов — $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5$ и $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$, на поверхностно-ионизационные свойства таких бронз.

Образцы для исследований получали спеканием таблеток, составленных из исходной бронзы с добавлением оксида молибдена, на воздухе при температуре 650 °С. Были приготовлены таблетки диаметром 7 мм и толщиной 1,5 мм из бронз составов $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$ и $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$, где $x = 0$;

1; 3; 5 масс. %. Рентгенофазовые исследования указанных сложных оксидных бронз показали, что в пределах чувствительности метода рентгенофазового анализа, в указанных системах новых фаз не образуется. При этом было отмечено, что легирование исходных оксидных бронз оксидом молибдена приводит к небольшим сдвигам некоторых рефлексов на рентгенограммах, что свидетельствует о небольших изменениях параметров кристаллической структуры бронз при сохранении моноклинного типа решетки. Однако исследование влияния легирования на параметры кристаллической решетки сложных оксидных бронз не входило в задачу данной работы.

В качестве тестового органического нитросоединения был использован гексоген, параметры поверхностной ионизации которого также представляют большой научный и практический интерес. Масса вводимых доз гексогена в их спиртовых растворах составляла $0,64 \cdot 10^{-6}$ г. Методика исследований и обработки результатов была такой же, как и при исследовании поверхностной ионизации ТНТ.

Получены температурные зависимости эффективности поверхностной ионизации гексогена на бронзах различных составов, на основании которых были рассчитаны значения энергии активации ионизации гексогена и значения предэкспоненциального множителя из уравнения (2). На рис. 5а приведены

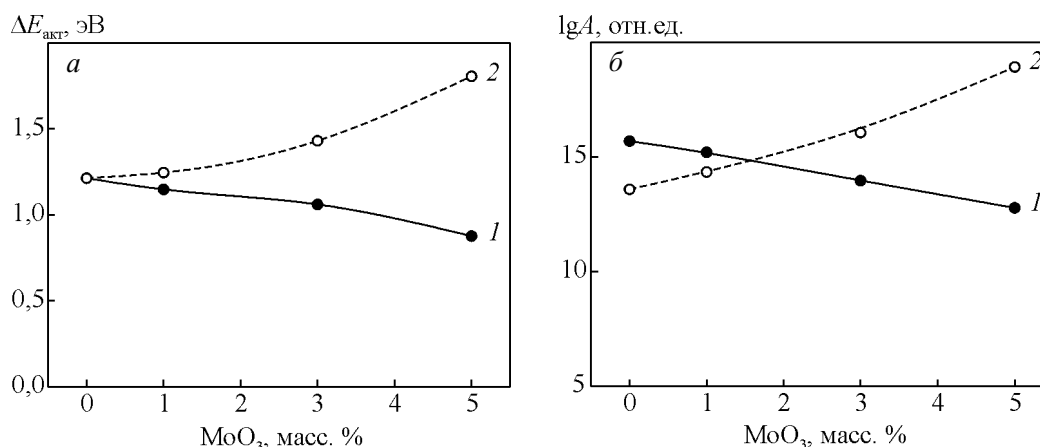


Рис. 5. Концентрационные зависимости энергии активации (а) и логарифма предэкспоненциального множителя A (б) при ионизации гексогена на поверхности бронз: 1 — $\text{Na}_{0,28}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$, 2 — $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{MoO}_3$, где $x = 0$; 1; 3; 5%.

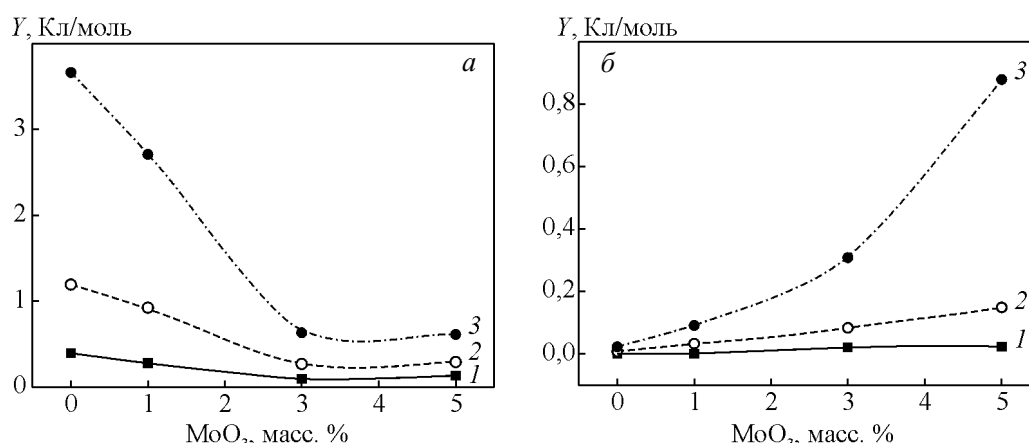


Рис. 6. Влияние легирования на эффективность поверхностной ионизации гексогена при различных значениях температуры для бронз: а — Na_{0,28}V₂O₅, б — Na_{0,33}V₂O₅.

концентрационные зависимости энергии активации ионизации гексогена на поверхности бронз составов: Na_{0,28}V₂O₅ + x·MoO₃ и Na_{0,33}V₂O₅ + x·MoO₃, где x = 0; 1; 3; 5%. На рис. 5б представлены концентрационные зависимости логарифма предэкспоненциального множителя A из соотношения (2) при ионизации гексогена на поверхности бронз тех же составов.

Полученные результаты показывают, что легирование оксидной бронзы оксидом молибдена разнонаправлено влияет на поверхностно-ионизационные свойства бронз, причем это влияние различно для исходных бронз состава Na_{0,28}V₂O₅ и Na_{0,33}V₂O₅.

Величина энергии активации поверхностной ионизации отражает величину энергетического барьера на поверхности бронз при десорбции с поверхности ионов органических молекул. Для исходной бронзы состава Na_{0,28}V₂O₅ с увеличением концентрации оксида молибдена энергия активации снижается, то есть уменьшается величина энергетического барьера на поверхности бронзы, а для исходной бронзы состава Na_{0,33}V₂O₅ величина энергии активации и, соответственно, величина энергетического барьера растет. Величина предэкспоненциального множителя A отражает концентрацию активных центров ионизации на поверхности оксидной бронзы. Для исходной бронзы состава Na_{0,28}V₂O₅ с увеличением концентрации оксида молибдена поверхностная концентрация активных центров также уменьшается, а для исходной бронзы состава Na_{0,33}V₂O₅ — увеличивается. Результирующее влияние легирования на эффективность поверхностной ионизации гексогена при различных значениях температуры для исходных бронз составов Na_{0,28}V₂O₅ и Na_{0,33}V₂O₅ показано на рис. 6.

Несмотря на разнонаправленный характер влияния легирования бронз оксидом молибдена на

величину энергетического барьера на поверхности бронз (энергия активации ионизации) и на величину концентрации активных центров на поверхности бронз, эффективность поверхностной ионизации гексогена с увеличением содержания оксида молибдена в составе бронзы Na_{0,28}V₂O₅ уменьшается во всем исследованном интервале температур. В то же время для бронз Na_{0,33}V₂O₅ эффективность поверхностной ионизации с ростом содержания оксида молибдена в составе бронз монотонно возрастает во всем исследованном интервале температур. При этом, однако, эффективность поверхностной ионизации гексогена на бронзах на основе Na_{0,28}V₂O₅ во всем интервале температур может достигать 3,6 КДж/моль при температуре 500 °С, в то время как на бронзах на основе Na_{0,33}V₂O₅ она не превышает 0,9 КДж/моль.

Результаты исследования сложных оксидных бронз при контролируемом содержании оксида молибдена в исходной бронзе объясняют причину нестабильности поверхностно-ионизационных свойств бронзы состава Na_{0,33}V₂O₅ при непосредственном контакте бронзы с молибденовым корпусом термоэммиттера [5]. Отмеченная нестабильность связана с изменением фазового состава бронзы, взаимодействующей с оксидом молибдена, образующимся при окислении материала корпуса термоэммиттера.

Заключение

1. Оксидные натрий-ванадиевые бронзы являются перспективными материалами для использования в качестве материалов термоэммиттеров ионов органических нитросоединений в масс-спектрометрах, газовых хроматографах и дрейф-спектрометрах. В частности, высокая эффективность иони-

зации нитросоединений на поверхности оксидных бронз позволяет создать приборы нового поколения для решения досмотровых задач — детектирования малых и сверхмалых количеств взрывчатых веществ, которые относятся к классу нитросоединений.

2. Наибольшей эффективностью поверхностной ионизации нитросоединений обладают монокристаллы оксидных бронз при ориентации поверхности термоэммитера, совпадающей с плоскостью (020) монокристалла.

3. Примеси таких элементов, как медь и серебро в составе оксидных бронз могут приводить к снижению эффективности поверхностной ионизации нитросоединений и к нестабильности параметров поверхностной ионизации нитросоединений во времени.

4. Легирование оксидных бронз оксидами элементов пятой группы, в частности оксидом молибдена, может приводить, в зависимости от исходного состава бронзы, как к снижению, так и к увеличению эффективности поверхностной ионизации нитросоединений. Вопрос о долговременной стабильности поверхностно-ионизационных свойств сложных оксидных бронз требует дальнейшего исследования.

Литература

1. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003, 683 с.
2. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003, 493 с.
3. Проблемы аналитической химии. Том 13. Внелабораторный химический анализ. Под редакцией академика Ю.А. Золотова, 2010, М.: Наука, 564 с.
4. Капустин В.И., Петров В.С., Черноусов А.А. Параметры ионизации некоторых нитросоединений на поверхности оксидной бронзы щелочного металла. Письма ЖТФ, 2004, т. 30, вып. 17, с. 19 – 22.
5. Захаров А.Ю., Капустин В.И., Быков Д.В., Петров В.С., Оксидная бронза щелочного металла как эффективный термоэммитер ионов органических соединений. Материалы XIV научно-технической конференции “Вакуумная наука и техника”, октябрь 2007 г., М.: Издательство МИЭМ, с. 251 – 255.
6. Фотиев А.А., Волков В.А., Капустин В.К. Оксидные ванадиевые бронзы. М.: Наука, 1978, 176 с.
7. Ozerov R.P., Streltsov V.A., Sobolev A.N. et al. Electron density in the sodium vanadium oxide bronz $\beta\text{-Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ at 9 K. Acta Cryst.B, 2001, v. 57, p. 244 – 250.
8. Yamada H., Ueda Y. Electric and structural properties of $\beta\text{-A}_x\text{V}_2\text{O}_5$ (A = Na, Ag). Journal of the physical society of Japan, 1999, v. 68, no. 8, p. 2735 – 2740.
9. Yamada H., Ueda Y. Structural and electric properties of $\beta\text{-Cu}_x\text{V}_2\text{O}_5$. Journal of the physical society of Japan, 2000, v. 69, no. 5, p. 1437 – 1442.

Статья поступила в редакцию 24.10.2012 г.

Капустин Дмитрий Владимирович — Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), студент 6-го курса. Специализируется в области физической электроники.

Буш Александр Андреевич — Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), доктор технических наук, профессор, директор Института. Специалист в области физикохимии и кристаллографии.

Захаров Анатолий Кузьмич — Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), кандидат технических наук, профессор. Специалист в области материалов и технологий электроники.

Капустин Владимир Иванович — Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области материалов и технологий электроники. E-mail: Kapustin@mirea.ru.