

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА
МЕДИ(I) КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОГО
ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ¹© 2024 г. К.В. Жерикова^{а,*}, С.В. Трубин^а, Д.П. Пищур^а, Н.Б. Морозова^а^аИнститут неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: ksenia@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023

После доработки 29.06.2023

Принята к публикации 10.07.2023

Получены новые данные о термическом поведении и процессах сублимации и плавления (гексафторацетилацетонато)(циклооктадиен-1,5)меди, [Cu(cod)(hfac)]. Конденсированная фаза исследована методами термического и дифференциального термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии: определены температура, энтальпия и энтропия плавления комплекса. Эффузионным методом Кнудсена с масс-спектрометрической регистрацией состава газовой фазы получена температурная зависимость давления насыщенного пара [Cu(cod)(hfac)] в интервале температур 293–337 К, рассчитаны термодинамические характеристики процесса сублимации при средней температуре экспериментального интервала и 298.15 К: $\Delta_{\text{субл}} H_m^0(T_{\text{ср}}) = 94.8 \pm 1.5$ кДж моль⁻¹, $\Delta_{\text{субл}} S_m^0(T_{\text{ср}}) = 200.9 \pm 3.2$ Дж моль⁻¹ К⁻¹; $\Delta_{\text{субл}} H_m^0(298.15 \text{ К}) = 95.8 \pm 3.1$ кДж моль⁻¹, $\Delta_{\text{субл}} S_m^0(298.15 \text{ К}) = 203.5 \pm 6.6$ Дж моль⁻¹ К⁻¹. Полученные величины сопоставлены с данными по аналогичному соединению иридия(I), [Ir(cod)(hfac)]. Результаты формируют подходы для оценки термодинамических свойств комплексов состава [M(cod)(hfac)] с целью определения оптимальных условий осаждения металлосодержащих покрытий. Подходы необходимы, когда соединения такого типа (например, [Ag(cod)(hfac)]) являются сверхчувствительными к процессу нагревания и отсутствует возможность определения надежных термодинамических характеристик экспериментальным путем.

Ключевые слова: давление насыщенного пара, энтальпия и энтропия сублимации и плавления, комплекс меди(I), β-дикетонат, циклооктадиен.

DOI: 10.31857/S0044453724010097, **EDN:** SFVQLA

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент активно разрабатывается химия разнолигандных комплексов металлов с β-дикетонатными и нейтральными лигандами [M(L)(β-дикетонато)] (M = Cu, Rh, Ir, Ag; L = 1,5-циклооктадиен, циклопентадин, карбонил и пр.) [1, 2], поскольку эти соединения являются эффективными прекурсорами для получения тонких пленок различного назначения в процессах химического газофазного осаждения [3–8]. Важную основу продуктивной реализации газофазных экспериментов составляют количественные данные о процессах парообразования (температурные зависимости давления насыщенных паров) и термическом поведении в конденсированной фазе (термическая устойчивость, фазовые переходы) используемого прекурсора. Совокупность этих данных определяет режим испарения в реакторе, позволяя прецизионно контроли-

ровать количество вещества, подаваемого в зону осаждения при определенной температуре парообразования. Несмотря на значимость указанных термических свойств, обсуждаемые данные существуют только для комплексов иридия(I) [9, 10]. Одной из причин такого отсутствия является невозможность проведения каких-либо исследований из-за термической нестабильности соединений. Ярким примером является комплекс [Ag(cod)(hfac)] [11], который может быть эффективно использован в газофазных процессах формирования покрытий и наночастиц серебра на материалах современных имплантатов как компонентов гетероструктур с активной антибактериальной поверхностью. В таком случае любые новые термические и термодинамические данные по какому-либо соединению из этого класса металлокомплексов не только имеют практическую значимость для технологических процессов,

¹ Материалы XV симпозиума с международным участием. Новосибирск, 3–7 июля 2023 г.

использующих изученный прекурсор, или фундаментальную — по накоплению надежных термодинамических данных, но и могут сформировать базис для поиска корреляций и соответствующих обобщений, которые позволят проводить оценку свойств тех комплексов, экспериментальные исследования по которым провести невозможно.

В фокусе настоящей работы находится исследование комплекса меди(I) с гексафторацетилацетонат-ионом, $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ (cod = циклооктадиен-1,5), и сравнение термодинамических параметров (плавление, сублимация) этого соединения и его ближайшего аналога, $[\text{Ir}(\text{cod})(\text{hfac})]$, с целью выявления влияния центрального атома (рис. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез комплекса $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ (CAS No. 86233-74-1) проведен по методике, приведенной в статье [12]. Полученное вещество очищено методом двойной сублимации в вакуумной градиентной печи при 330–340 К и остаточном давлении ≈ 7 Па. Выход 75%. Соединение является кристаллическим веществом ярко-желтого цвета. Чистота образца — не ниже 99.5%.

Элементный анализ на содержание С, Н, F выполнен в Химическом исследовательском центре коллективного пользования СО РАН на элементном экпресс-анализаторе Carlo-Erba-1106 (Италия) [13]. Для $\text{C}_{13}\text{H}_{13}\text{F}_6\text{O}_2\text{Cu}$ (масс. %) найдено: С, 41.34; Н, 3.61; F 29.69; вычислено: С, 41.22; Н, 3.46; F 30.09. Методом атомно-эмиссионного анализа на спектрографе PGS-2 (Германия) в аналитической лаборатории ИНХ СО РАН проведен количественный химический анализ на содержание микропримесей, содержание которых было менее пределов обнаружения (<0.1 мас. %). По совокупности количественный элементный анализ показал содержание примесей в образце менее 0.5%.

Комплексный термический анализ (ТГ/ДТА), включающий одновременное проведение термогравиметрического анализа и дифференциально-

го термического анализа, выполнен на приборе Iris Netzsch TG 209 F1. Эксперименты осуществляли в условиях, аналогичных тем, в которых проводилась съемка образца $[\text{Ir}(\text{cod})(\text{hfac})]$ [10], — в атмосфере гелия (30 мл/мин) в диапазоне температур 303–535 К (скорость нагрева 10 К/мин) в тиглях (Al) открытого типа; масса образца составляла 10.104 мг (погрешность взвешивания 0.001 мг).

Калориметрические измерения проведены в дифференциальном сканирующем калориметре теплового потока NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix. Навески вещества составляли 6–13 мг (погрешность взвешивания 0.01 мг) и при проведении опытов находились в герметично закрытых алюминиевых тиглях объемом 25 мкл. Образец нагревали со скоростью 9 К/мин в атмосфере аргона. Процедура и техника эксперимента подробно описаны ранее [14]. Стандартная неопределенность в измерениях теплового эффекта, предсказанная на основе калибровочных экспериментов (Hg, In, Sn, Bi, Zn), составила менее 3% (свидетельство о проверке № С-С/02-02-2022/129404261).

Давление насыщенных паров над кристаллическим $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ измеряли эффузионным методом Кнудсена с масс-спектрометрической регистрацией состава газовой фазы. Подробное описание метода и оборудования представлено в [15]. Эксперименты проводили на масс-спектрометре МИ-1201 с разрешающей способностью не менее 1000 на уровне 10% высоты пика в диапазоне массовых чисел 1200 а.е.м. при энергии ионизирующих электронов 35 эВ.

Источник пара, описанный ранее в работе [15, 16], помещали непосредственно перед входной щелью ионизатора источника ионов масс-спектрометра. Навески вещества составляли 2–4 мг. В работе использовали молибденовые эффузионные камеры диаметром внутренней полости 7 мм и длиной 8 мм с эффузионным отверстием 0.3 мм и длиной канала 0.4 мм. Температуру эффузионной камеры задавали с помощью прецизионного терморегулятора ПИТ-3. Температуру испари-

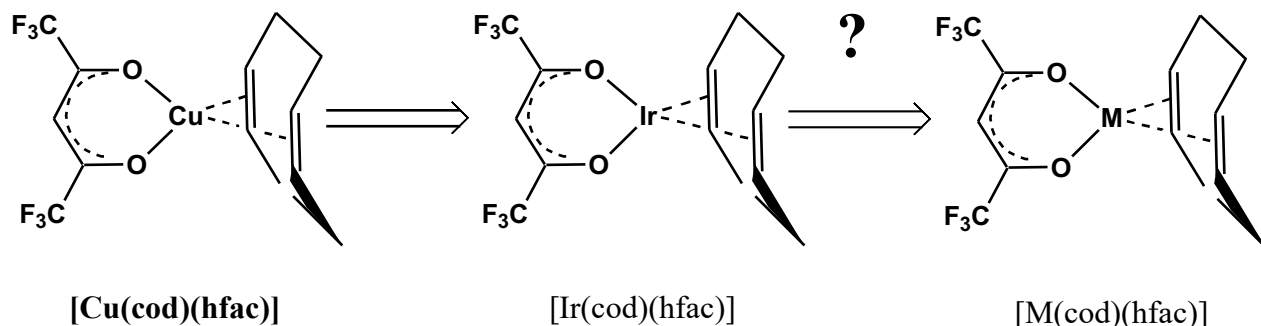


Рис. 1. Обсуждаемые в статье β -дикетонаты металлов (I).

теля изменяли ступенчато в любом направлении с произвольным шагом при одновременной регистрации интенсивности измеряемого сигнала и температуры. Для калибровки чувствительности масс-спектрометра использовали известную в литературе методику испарения известного количества вещества [17]. Определение давления паров проводили по пику молекулярного иона $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]^+$ (m/z 378). Расчет давления паров, p_i , при температуре T_i в камере Кнудсена проводили по приведенному уравнению Герца–Кнудсена [15, 17]:

$$p_i = \frac{2279.62 m I_i T_i}{S_{\text{eff}} M^{1/2} \sum_i \int_0^t I_i T_i^{1/2} dt}, \quad (1)$$

где m — масса вещества, испарившегося за время всего эксперимента t , I_i — интенсивность ионного тока при установившейся температуре T_i , S_{eff} — константа, зависящая от геометрических размеров эффузионного отверстия, M — молекулярный вес вещества, I_i и T_i — текущие значения интенсивности и температуры в процессе установления изотермического режима. Относительная погрешность взвешивания составляла 3%. Погрешность в определении давления пара не превышала $\pm 15\%$ при точности измерения температуры ± 1 К и ошибке в измерении интенсивности $\pm 1\%$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Термическое исследование

Образец $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ сохраняет первоначальную массу примерно до 360 К, при дальнейшем повышении температуры начинается парообразование вещества, завершающееся к 450 К (рис. 2). Масса нелетучего остатка составляет $\sim 2.7\%$, гладкая одноступенчатая ТГ-кривая, сви-

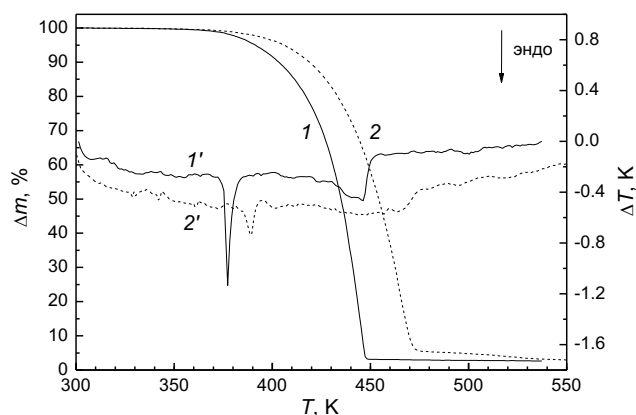


Рис. 2. ТГ/ДТА-кривые $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ (1/1), $[\text{Ir}(\text{cod})(\text{hfac})]$ (2/2) [10].

детельствующая о быстрой потере массы, имеет вид, типичный для летучих соединений металлов с β-дикетонами. Потеря массы образца начинается после плавления. Обнаруженный на ДТА-кривой единственный эндоэффект при температуре 375 К относится к плавлению, значение прекрасно согласуется с результатами ДСК.

С целью сравнения на график нанесены ТГ/ДТА-кривые для иридиевого аналога [10] (рис. 2). Комплекс $[\text{Ir}(\text{cod})(\text{hfac})]$ обладает меньшей летучестью по сравнению с $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ (454–435 К при 50% потере массы) и на 14 К большей температурой плавления.

Согласно калориметрическим исследованиям, плавление $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ приводит к частичному разложению комплекса. Проведено несколько экспериментов с разными навесками образцов, обработку проводили по данным только первого нагрева. В результате получены следующие значения температуры ($T_{\text{пл}}$) и термодинамических величин энтальпии ($\Delta_{\text{пл}} H_{T_{\text{пл}}}^{\circ}(T_{\text{пл}})$) и энтропии ($\Delta_{\text{пл}} H_{T_{\text{пл}}}^{\circ}(T_{\text{пл}})$) плавления с погрешностями для 95% доверительного интервала: $\Delta_{\text{пл}} H_{T_{\text{пл}}}^{\circ}(T_{\text{пл}}) = 32.7 \pm 1.0$ кДж моль⁻¹, $\Delta_{\text{пл}} H_{T_{\text{пл}}}^{\circ}(T_{\text{пл}}) = 87.2 \pm 2.6$ кДж моль⁻¹ К⁻¹.

Давление насыщенных паров

Давления насыщенных паров $[\text{Cu}(\text{cod})(\text{hfac})]$ измерены в диапазоне температур 293–337 К. Экспериментальные значения представлены в табл. 1. Полученные данные (рис. 3) обрабатывали с помощью уравнения [18, 19]:

$$R \ln(p / p_{\text{ref}}) = a + b / T + \Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ} \ln(T / T_0), \quad (2)$$

где a и b — подгоночные параметры, $\Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ}$ — разность молярных изобарных теплоемкостей газовой и кристаллической фаз, T_0 — произвольная температура, выбранная нами равной 298.15 К, $p_{\text{ref}} = 1$ Па. Стандартная молярная энтальпия, $\Delta_{\text{субл}} H_T^{\circ}$, и энтропия, $\Delta_{\text{субл}} S_T^{\circ}$, сублимации при температуре T могут быть получены из уравнения 2 следующим образом:

$$\Delta_{\text{субл}} H_m^{\circ}(T) = -b + \Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ} T, \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{субл}} H_m^{\circ}(T) = \Delta_{\text{субл}} H_m^{\circ}(T) / T + R \ln(p / 10^5 p_{\text{ref}}). \quad (4)$$

Величину $\Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ}$ (298.15 К) оценили с помощью уравнения, предложенного в работах Чикоса и Акри [20, 21]:

$$-\Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ} = 0.75 + 0.15 C_{p,m}^{\circ} (\text{кр.}). \quad (5)$$

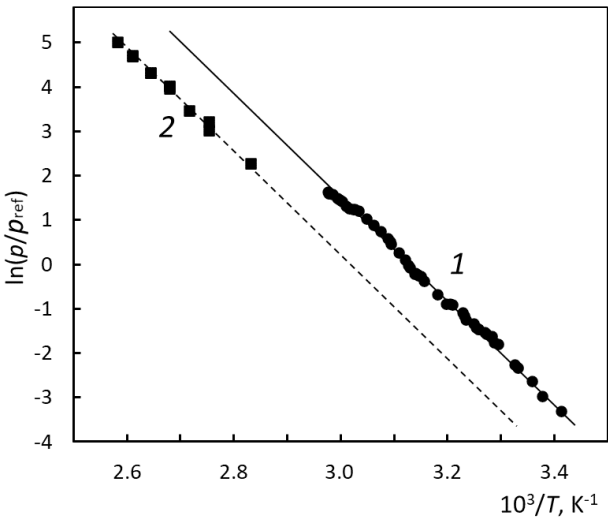


Рис. 3. Температурные зависимости давления насыщенных паров над кристаллическими [Cu(cod)(hfac)] (1, • – данная работа) и [Ir(cod)(hfac)] (2, ■ – [9]), $p_{\text{ref}} = 1$ Па.

Значение молярной изобарной теплоемкости кристаллической фазы, $C_{p,m}^{\circ}$ (кр., 298.15 К) [Cu(cod)(hfac)], приняли равной соответствующей теплоемкости иридиевого аналога [Ir(cod)(hfac)] – 384.6 Дж моль⁻¹ К⁻¹ [9, 22], поскольку, как уже

было отмечено нами [23] и другими авторами [24], экспериментальные $C_{p,m}^{\circ}$ (кр., 298.15 К)-значения β-дикетонатных комплексов металлов с одинаковыми лигандами мало зависят от типа металла. Вычисленную с помощью этого значения и эмпирического уравнения (5) величину $\Delta_{\text{субл}} C_{p,m}^{\circ}$ (298.15 К) = –58.4 Дж моль⁻¹ К⁻¹ использовали при статистической обработке экспериментальных данных по давлению насыщенных паров в соответствии с уравнением (2). Полученная температурная зависимость представлена в табл. 1. Значения термодинамических величин энтальпии и энтропии сублимации, рассчитанные при средней температуре экспериментального интервала и при эталонной температуре 298.15 К (с комбинированными погрешностями для 95% доверительного интервала, полученными в соответствии с методикой, описанной в [25]), представлены в табл. 2.

Данные по давлению насыщенных паров над кристаллическим [Ir(cod)(hfac)] и соответствующие термодинамические характеристики, опубликованные нами ранее [9, 22], также приведены на рис. 3 и в табл. 2. Как и в условиях термогравиметрического эксперимента, летучесть комплекса с атомом меди, имеющим атомную массу, в три раза меньшую, чем у атома иридия, выше, однако давление отличается менее чем на 0.5 порядка

Таблица 1. Давление насыщенных паров над кристаллическим [Cu(cod)(hfac)], полученное эффузионным методом Кнудсена с масс-спектрометрической регистрацией состава газовой фазы: p_i – экспериментальные значения, $p_{\text{расч}}$ – рассчитанные по соответствующему уравнению, $p_{\text{ref}} = 1$ Па

T, K^a	$p_i, \text{Па}^b$	$p_{\text{расч}}, \text{Па}$	T, K^a	$p_i, \text{Па}^b$	$p_{\text{расч}}, \text{Па}$	T, K^a	$p_i, \text{Па}^b$	$p_{\text{расч}}, \text{Па}$	T, K^a	$p_i, \text{Па}^b$	$p_{\text{расч}}, \text{Па}$
$\ln \frac{p}{p_{\text{ref}}} = \frac{358.5}{R} - \frac{113252.1}{RT} - \frac{58.4}{R} \ln \frac{T}{298.15}$											
293.0	0.037	0.039	307.3	0.241	0.240	318.0	0.791	0.840	328.0	2.814	2.494
296.1	0.051	0.058	307.8	0.262	0.255	318.5	0.820	0.889	329.7	3.346	2.980
297.8	0.071	0.073	309.2	0.290	0.302	318.6	0.811	0.899	330.5	3.498	3.238
300.1	0.098	0.098	309.5	0.317	0.313	319.5	0.930	0.994	330.7	3.500	3.306
300.7	0.105	0.106	309.8	0.338	0.325	319.9	0.977	1.039	331.5	3.545	3.590
303.5	0.166	0.151	311.6	0.401	0.402	320.5	1.107	1.111	332.3	3.735	3.897
304.2	0.173	0.164	312.0	0.409	0.421	321.7	1.311	1.268	333.0	4.143	4.185
304.6	0.199	0.173	312.7	0.409	0.457	323.4	1.670	1.526	333.6	4.332	4.448
305.5	0.210	0.193	314.4	0.511	0.557	323.2	1.575	1.493	334.0	4.483	4.632
305.9	0.217	0.203	316.9	0.685	0.742	323.8	1.783	1.593	335.1	4.863	5.174
306.9	0.234	0.229	317.5	0.762	0.794	325.3	2.093	1.870	335.9	4.985	5.606
307.0	0.235	0.232	317.9	0.777	0.831	326.6	2.417	2.148	336.1	5.171	5.719

^a Стандартная погрешность $u(T) = 1.0$ К.
^b Комбинированная относительная стандартная погрешность: $u_r(p) = 0.15 \cdot p_{\text{эксп}}$ Па.

Таблица 2. Значения стандартной молярной энтальпии, $\Delta_{\text{субл}}H_m^{\circ}(T)$, и стандартной молярной энтропии, $\Delta_{\text{субл}}S_m^{\circ}(T)$, сублимации [Cu(cod)(hfac)] при средней температуре экспериментального интервала, $T_{\text{ср}}$, и при 298.15 K^a

Соединение	Метод ^b	$\Delta T(T_{\text{ср}})$, К	n^c	$\Delta_{\text{субл}}H_m^{\circ}(T_{\text{ср}})$, кДж моль ⁻¹	$\Delta_{\text{субл}}S_m^{\circ}(T_{\text{ср}})$, Дж моль ⁻¹ К ⁻¹	$\Delta_{\text{субл}}H_m^{\circ}$ (298.15 К), кДж моль ⁻¹	$\Delta_{\text{субл}}S_m^{\circ}$ (298.15 К), Дж моль ⁻¹ К ⁻¹
[Cu(cod)(hfac)] эта работа	К	293–337 (314.6)	48	94.8 ± 1.5	200.9 ± 3.2	95.8 ± 3.1	203.5 ± 6.6
[Ir(cod)(hfac)] [9, 22]	П	353–387 (370.2)	12	91.7 ± 2.0	182.7 ± 4.0	96.0 ± 2.6	196.0 ± 5.0

Примечание. К значениям энтальпий и энтропий сублимации приведены расширенные неопределенности ($k=2$), рассчитанные согласно методике, описанной в [25], и включающие неопределенности, связанные с условиями проведения эксперимента, обработки и отнесением характеристик к эталонной температуре $T = 298.15$ К; К — эффузионный метод Кнудсена, П — метод потока, n — количество экспериментальных точек.

$$\left(\ln\left(\frac{p_i}{p_{\text{ref}}}\right)\right) = \frac{349.7}{R} - \frac{113361.0}{RT} - \frac{58.4}{R} \ln \frac{T}{298.15} \quad \text{для}$$

[Ir(cod)(hfac)] [22]). В предположении, что влияние центрального атома оказывается ничтожным (подобное ранее показано нами для ряда *трис*- β -дикетонатов родия и иридия [23]), температурные зависимости давления насыщенных паров медного или иридиевого комплексов можно использовать для оценки разнолигандного комплекса Ag(I) с циклооктадиеном-1,5 и гексафторацетилацетонат-анионом, для которого провести тензиметрические измерения невозможно, и для других соединений состава [M(cod)(hfac)].

Таким образом, исследован разнолигандный комплекс меди(I) с гексафторацетилацетонатом и циклооктадиеном-1,5, [Cu(cod)(hfac)]. Впервые изучены его термические свойства: поведение в конденсированной фазе и давление насыщенных паров, определены термодинамические характеристики — энтальпия и энтропия сублимации и плавления. Сравнение с аналогичным комплексом иридия(I) показало, что центральный атом комплекса оказывает незначительное влияние на термические свойства этих соединений, что позволяет переносить полученные данные на изолигандные соединения других металлов(I). Результаты исследования термодинамических свойств комплексов меди(I) и иридия(I) будут использованы для оценки термодинамических параметров процессов парообразования [Ag(cod)(hfac)], который является одним из немногих эффективных прекурсоров для осаждения Ag наночастиц и пленочных структур. Таким образом, представленные данные о термодинамических свойствах комплекса меди(I) и выявленная схожесть с таковыми для комплекса иридия(I) расширяют возможности проведе-

ния прецизионных газофазных процессов осаждения покрытий с использованием комплексов состава [M(cod)(hfac)] с металлами, отличными от меди и иридия.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования РФ. Авторы выражают благодарность Е.С. Видуловой за предоставление первичных ТГ/ДТА-данных по комплексу иридия и А.М. Макаренко за помощь в очистке комплекса меди.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 20-15-00222-П).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karakovskaya K.I., Dorovskikh S.I., Vikulova E.S. et al. // Coatings. 2021. V. 11. No 1. P. 78. doi 10.3390/coatings11010078.
2. Hnyk D., Bühl M., Brain P.T. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2002. V. 124. No 27. P. 8078. doi 10.1021/ja012505a.
3. Baum Th.H., Larson C.E., Reynolds S.K. Ligand Stabilized +1 Metal Beta-diketonate Coordination Complexes and Their Use in Chemical Vapor Deposition of Metal Thin Films: Patent US-5096737-A. Publication Date: 1992-03-16. Assignee: International Business Machines Corp.

4. Gao L., Härter P., Linsmeier Ch. et al. // *Microelectron. Eng.* 2005. V. 82. No 3–4. P. 296. doi 10.1016/j.mee.2005.07.078.
5. Xu C., Baum Th.H., Drive C., Rheingold A.L. // *Chem. Mater.* 1998. V. 10. No 9. P. 2329. doi 10.1021/cm980346x
6. Лозанов В.В., Ильин И.Ю., Морозова Н.Б. и др. // *ЖНХ*. 2020. Т. 65. № 11. С. 1570. (Lozanov V.V., Il'in I.Y., Morozova N.B. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. No 11. 1781). doi 10.1134/S0036023620110108.
7. Kuo Y.-L., Lee Ch., Chen G. et al. // *Electrochem. Solid-State Lett.* 2007. V. 10. No 5. P. D51. doi 10.1149/1.2710956.
8. Panin A.V., Shugurov A.R., Liskovskaya T.I. et al. // *Proc. Electrochem. Soc.* 2003. V. 2003–8. P. 1297
9. Vikulova E.S., Karakovskaya K.I., Ilyin I.Y. et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. V. 23. No 16. P. 9889. doi 10.1039/D1CP00464F
10. Vikulova E.S., Ilyin I.Y., Karakovskaya K.I. et al. // *J. Coord. Chem.* 2016. V. 69. No 15. P. 2281. doi 10.1080/00958972.2016.1198955.
11. Golrokhi Z., Chalker S., Sutcliffe Ch.J., Potter R.J. // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 364. P. 789. doi 10.1016/j.apusc.2015.12.127.
12. Chi K.M., Shin H.-K., Hampden-Smith M.J. et al. // *Polyhedron*. 1991. V. 10. No 19. P. 2293. doi 10.1016/S0277-5387(00)86153-7.
13. Fadeeva V.P., Tikhova V.D., Nikulicheva O.N. // *J. Anal. Chem.* 2008. V. 63. P. 1094. doi 10.1134/S1061934808110142.
14. Макаренко А.М., Куратьева Н.В., Пищур Д.П., Жерикова К.В. // *ЖНХ*. Т. 68. № 2. С. 221. (Makarenko A.M., Kuratieva N.V., Pischur D.P. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2023. V. 68. No 2. P. 183. doi 10.1134/S0036023622602215).
15. Semyannikov P.P., Igumenov I.K., Trubin S.V. // *Thermochim. Acta*. 2005. V. 432. No 1. P. 91. doi 10.1016/j.tca.2005.02.034.
16. Гранкин В.М., Семянников П.П. // *Приборы и техника эксперимента*. 1991. № 4. С. 129.
17. Сидоров А.Н., Коробов М.В., Журавлева Л.В. *Масс-спектральные термодинамические исследования*. М.: МГУ, 1985. 208 с.
18. Kulikov D., Verevkin S.P., Heintz A. // *J. Chem. Eng. Data*. 2001. V. 46. No 6. P. 1593. doi 10.1021/je010187p
19. Kulikov D., Verevkin S.P., Heintz A. // *Fluid Phase Equilib.* 2001. V. 192. No 1–2. P. 187. doi 10.1016/S0378-3812(01)00633-1
20. Chickos J.S., Hosseini S., Hesse D.G., Liebman J.F. // *Struct. Chem.* 1993. V. 4. No 4. P. 271. doi 10.1007/BF00673701.
21. Acree W., Chickos J.S. // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 2016. V. 45. No 3. P. 033101. doi 10.1063/1.4948363.
22. Жерикова К.В., Макаренко А.М., Караковская К.И. и др. // *ЖОХ*. 2021. Т. 91. № 10. С. 1548. (Zherikova K.V., Makarenko A.M., Karakovskaya K.I. et al. // *Russ. J. Gen. Chem.* V. 91. No 10. P. 1990). doi 10.1134/S1070363221100108.
23. Zherikova K.V., Vikulova E.S., Makarenko A.M. et al. // *Thermochim. Acta*. 2020. V. 689. P. 178643. doi 10.1016/j.tca.2020.178643
24. Беспятов М.А., Черняйкин И.С., Кузин Т.М., Гельфонд Н.В. // *Журн. физ. химии*. 2022. Т. 96. № 9. С. 1266. (Bespyatov M.A., Cherniaikin I.S., Kuzin T.M., Gel'fond N.V. // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2022. V. 96. No 9. P. 1865). doi 10.1134/S0036024422090047.
25. Verevkin S.P., Sazonova A.Y., Emel'yanenko V.N. et al. // *J. Chem. Eng. Data* 2015. V. 60. No 1. P. 89. doi 10.1021/je500784s.