НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2023, том 59, № 10, с. 1095–1104

УДК 536.631

СИНТЕЗ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИТЕЛЛУРИДА РУТЕНИЯ

© 2023 г. Н. А. Полотнянко[1, *], А. В. Тюрин[2], Д. А. Чареев[1, 3], А. В. Хорошилов[2], Е. А. Попов[1]

[1]Государственный университет "Дубна", ул. Университетская, 19, Московская обл., Дубна, 141982 Россия

[2]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

[3]Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского Российской академии наук, ул. Академика Осипьяна, 4, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

**e-mail: polot.nat@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.07.2023 г.
После доработки 15.08.2023 г.
Принята к публикации 16.08.2023 г.

Работа посвящена синтезу и изучению термодинамических свойств кристаллического дителлурида рутения $RuTe_2$ в интервале от 10 до 965 K на основании собственных калориметрических измерений изобарной теплоемкости C_p. В низкотемпературной области 6.86–335.11 K теплоемкость синтезированного чистого, без примесей и посторонних фаз, образца измерена с помощью адиабатической калориметрии, при 315.3–965.3 K C_p исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии. На основании полученных данных выше 298 K определены эмпирические коэффициенты уравнений Майера–Келли и Ходаковского. В диапазоне 10–965 K рассчитаны величины стандартных термодинамических функций: теплоемкости, энтропии, изменения энтальпии и приведенной энергии Гиббса. При 298.15 K получили значения $C_p^\circ = 72.43 \pm 0.14$ Дж/(K моль), $S^\circ = 94.94 \pm 0.19$ Дж/(K моль), $H^\circ(298.15\ \text{K}) - H^\circ(0) = 14.60 \pm 0.03$ кДж/моль, $\Phi^\circ = 45.97 \pm 0.09$ Дж/(K моль). Применение собственного значения абсолютной энтропии, а также литературных и справочных данных позволило оценить энергию Гиббса образования $\Delta_f G^\circ(RuTe_2, \text{кр.}, 298.15) = -130.5 \pm 2.9$ кДж/моль.

Ключевые слова: теплоемкость, дителлурид рутения, халькогениды платиноидов, адиабатическая калориметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, энтропия, термодинамические функции

DOI: 10.31857/S0002337X2310010X, **EDN:** APQKFI

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является частью исследований термодинамических характеристик халькогенидов платиноидов в широком интервале температур [1, 2].

Литературные данные по термодинамическим свойствам дителлурида рутения, являющегося синтетическим теллуровым аналогом минерала лаурита [3], ограничены одной экспериментальной работой, в которой авторы [4] с помощью адиабатического калориметра измерили энтальпии нагревания $RuTe_2$ в интервале 373–1473 K относительно 298 K. В работе [4] представлены сглаженные энтальпии $H^\circ(T) - H^\circ(298\ \text{K})$ вместе с полученными теплоемкостями C_p и приращениями энтропии $S^\circ(T) - S^\circ(298\ \text{K})$ в интервале 100 K.

Дителлурид рутения находит широкое практическое применение [5–7]. Определение новых термодинамических характеристик для дителлурида рутения, относящегося к полупроводникам *n*-типа [8], представляет несомненный интерес, т.к. эти данные имеют важное значение при изучении природных процессов рудообразования и отложения рутениевых минералов, для прогнозирования существования стабильных комплексов этого металла в естественных условиях, а также при разработке методов извлечения рутения и других платиноидов из природных руд.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез и анализ образцов. Синтез проводился из простых веществ, взятых в стехиометрическом

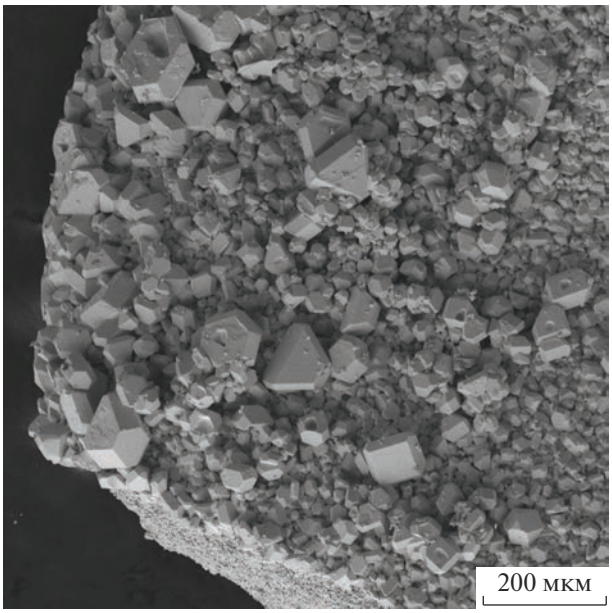

Рис. 1. Электронная фотография кристаллов дителлурида рутения в режиме вторичных электронов.

соотношении, с небольшим избытком теллура. Вещества помещались в ампулу из кварцевого стекла, затем ампула вакуумировалась, запаивалась в пламени кислородной горелки и помещалась в горизонтальную трубчатую печь, обладающую градиентным температурным полем, направленным вдоль оси трубы. Температуры горячего и холодного концов ампулы контролировались термопарами. Запаянная ампула выдерживалась в печи при 550/530°C в течение месяца, после чего вещество извлекали, перетирали, вновь запаивали и еще месяц выдерживали при температуре 640/625°C. Во время синтеза избыток теллура конденсировался в холодной части ампулы и легко отделялся.

Также были синтезированы кристаллы дителлурида рутения методом испарения растворителя. Для этого в горячей части реакционного сосуда в форме бумеранга [9] расплавляли теллур, содержащий рутений и порошкообразный $RuTe_2$. При поддержании высокой температуры в горячей части теллур постепенно испарялся и конденсировался в холодной зоне, образуя кристаллы $RuTe_2$. Рост кристаллов в течение 5 сут проводился в двух температурных режимах: при 720°C в горячей и 600°C в холодной зонах. При увеличении температуры до 820°C в горячей и 750°C в холодной частях сосуда произошел рост гексагональных изометрических кристаллов дителлурида рутения.

Первичную характеризацию синтезированных образцов в виде порошка и кристаллов проводили методами рентгеноспектрального микроанализа и рентгенофазового анализа.

С помощью электронного микроскопа (TESCAN Vega II XMU) получены электронные изображения всех образцов $RuTe_2$. На рис. 1 изображены монокристаллы в режиме вторичных электронов, а на рис. 2 – участки порошкообразного кристаллического дителлурида рутения в режиме отра-

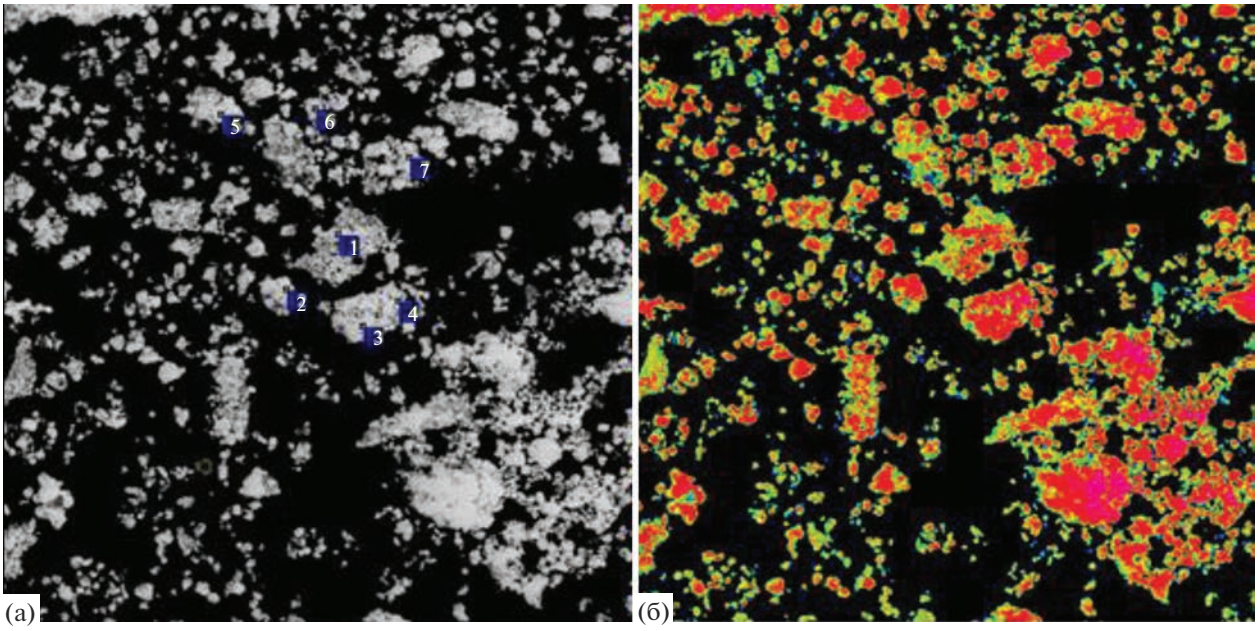

Рис. 2. Электронные фотографии участка образца дителлурида рутения в режиме отраженных электронов (б – после цветовой обработки).

женных электронов до и после цветовой обработки, также помечены номера точек, взятых для микроанализа.

Результаты рентгеноспектрального микроанализа представлены в табл. 1. Видно, что полученный порошок представляет собой чистый $RuTe_2$, состав которого близок к стехиометрическому (32 мас. % Ru, 68 мас. % Te). Отметим, что общая массовая доля не достигает 100%, что можно связать с тем, что размер частиц меньше размера зоны возбуждения.

Рентгенофазовый анализ проводили с помощью рентгеновского широкополосного дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (излучение CuK_α, Fe-фильтр, напряжение 40 кВ, сила тока 40 мА, скорость сканирования 0.3 с/шаг, шаг сканирования 0.0133°). Перед анализом была проведена калибровка прибора по стандартному веществу – корунду. Расшифровку дифрактограммы проводили, используя базы данных Find It [10], PCPDFWIN [11] и MINCRYST [12]. На дифрактограмме (рис. 3) видно, что полученные экспериментальные данные совпадают с литературными и в образце отсутствуют примеси. С помощью программного обеспечения TOPAS [13] была определена кристаллическая структура и рассчитаны кристаллографические параметры. Дителлурид рутения имеет ку-

Таблица 1. Результаты рентгеноспектрального микроанализа дителлурида рутения

Спектр	*C*, мас. %		
	Te	Ru	сумма
1	64.26	22.81	87.07
2	64.03	23.79	87.82
3	63.14	24.18	87.33
4	62.23	22.98	85.21
5	61.58	22.84	84.43
6	60.04	23.16	83.21
7	59.76	21.02	80.78
Среднее	62.15	22.97	85.12
Стандартное отклонение	1.8	1	
Макс.	64.26	24.18	
Мин.	59.76	21.02	
Доверительный интервал	0.89	1.61	

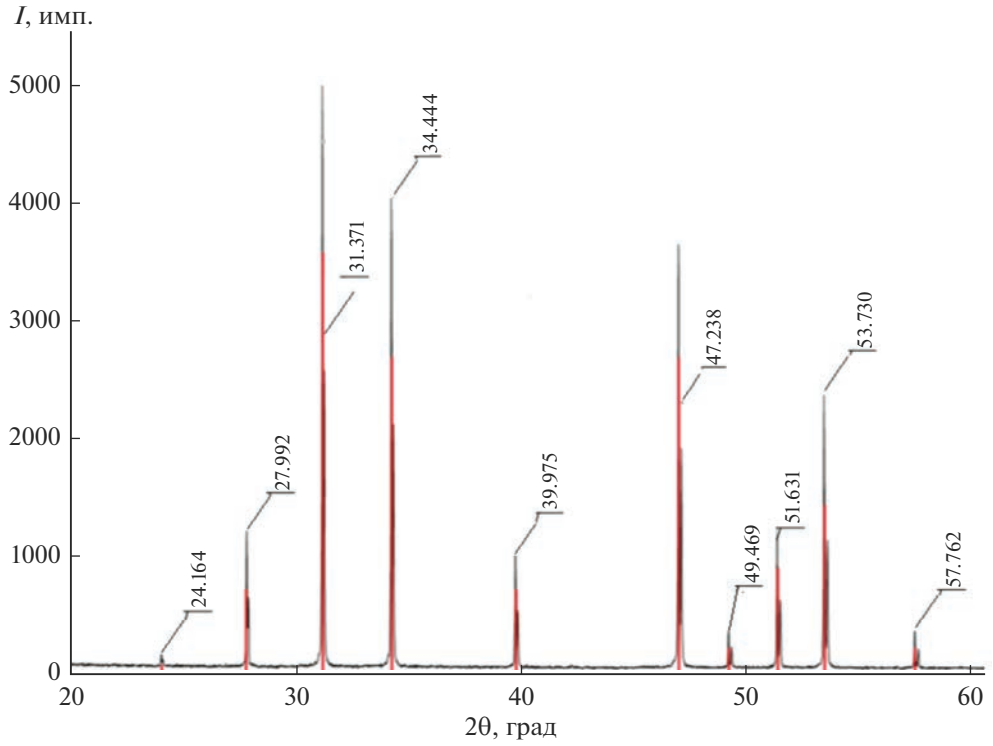

Рис. 3. Дифрактограмма кристаллического дителлурида рутения (красными линиями обозначены совпадающие пики по литературным данным).

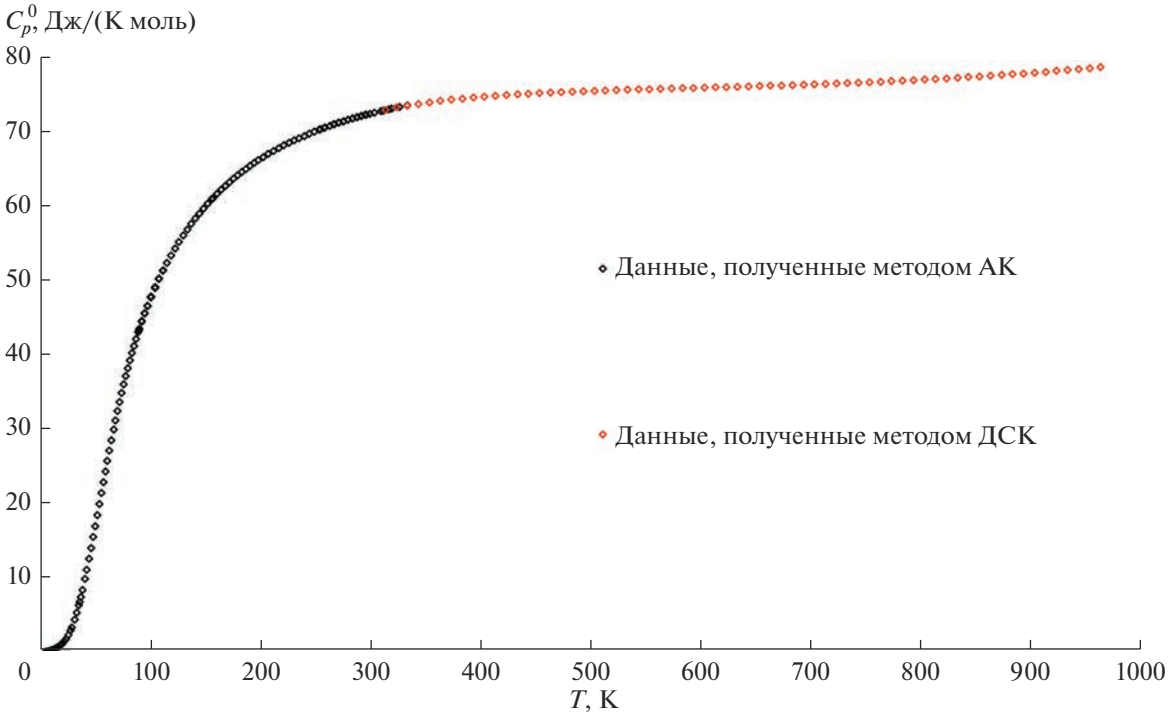

Рис. 4. Согласование экспериментальных данных по изобарной теплоемкости для $RuTe_2$ (кр.).

бическую сингонию, пр. гр. $Pa\bar{3}$, a = 0.6391 нм, плотность образца составляет 9.065 г/см^3. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [8].

Низкотемпературные измерения теплоемкости. Для измерений изобарной теплоемкости методом адиабатической калориметрии (**АК**) применяли полностью автоматизированную теплофизическую установку БКТ-3 (АОЗТ "Термис", п. Менделеево Московской обл.), работающую как адиабатический вакуумный калориметр с дискретным нагревом [14].

Для измерений образец кристаллического дителлурида рутения помещался в титановый контейнер, закрытый крышкой через индиевую прокладку бронзовой гайкой. Готовый контейнер с образцом загружался в криостат.

Все измерения теплоемкости в диапазоне 91.16–335.11 K (82 эксп. точки) проводились погружением криостата в сосуд Дьюара с жидким азотом, а в интервале 6.86–90.59 K (53 эксп. точки) – в жидком гелии. Автоматическое программное обеспечение измеряло соотношение dQ/dT и переводило в теплоемкость C_p°. Масса измеренного образца $RuTe_2$ составляла 1.7307 г, молекулярная масса 356.27 г/моль рассчитана с использованием атомных масс, приведенных в [15].

Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Сглаживание экспериментальных значений $C_p^\circ = f(T)$ проводили с использованием метода сплайн-аппроксимации [16], являющегося частью математического обеспечения банка данных ИВТАНТЕРМО [17].

Высокотемпературные измерения теплоемкости. Измерения изобарной теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии (**ДСК**) проводили на установке синхронного термического анализа Netzsch STA 449 F1 Jupiter® (Германия) в атмосфере газообразного аргона марки "5.0" (99.999%) в Pt–Rh-тиглях с крышкой и вкладышем из Al_2O_3. Калибровка по температуре плавления проводилась с использованием металлических стандартов (In, Bi, Zn, Al, Ag и Au). Перед началом эксперимента проводили два цикла откачки–заполнения аргоном внутреннего объема весов и печи.

Для корректного измерения удельной теплоемкости одним из важнейших условий является неизменность массы образца. Начальная навеска составляла 112.87 мг. При первом нагревании на кривой ДСК эндотермические эффекты и изменения массы не обнаружены. Экспериментальные значения изобарной теплоемкости в области 315.3–965.3 K (скорость 10 K/мин), полученные

Таблица 2. Экспериментальные значения теплоемкости $RuTe_2$, полученные методом адиабатической калориметрии

T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)
Серия 1 (азот)		96.51	45.67	250.75	70.15	32.90	4.395
102.03	47.79	99.09	46.68	255.20	70.41	34.76	5.298
105.73	49.07	102.30	47.89	259.63	70.65	36.62	6.306
109.41	50.27	105.99	49.16	268.42	71.11	37.40	6.759
113.04	51.37	109.67	50.35	272.76	71.32	38.48	7.413
116.72	52.43	113.36	51.47	277.04	71.53	39.98	8.383
120.40	53.43	Серия 4 (азот)		281.28	71.72	42.20	9.881
124.03	54.36	91.16	43.37	285.46	71.90	43.88	11.09
127.71	55.25	93.78	44.52	289.54	72.07	45.92	12.61
131.61	56.15	96.38	45.61	293.61	72.24	47.78	14.04
135.25	56.94	98.99	46.64	297.61	72.40	49.64	15.50
138.95	57.70	102.36	47.91	313.38	72.97	51.50	16.98
142.65	58.43	106.11	49.20	320.88	73.22	53.36	18.47
146.35	59.12	Серия 5 (азот)		328.04	73.45	55.22	19.95
150.06	59.78	158.49	61.17	335.11	73.66	57.08	21.44
153.78	60.41	162.34	61.76	Серия 6 (гелий)		58.94	22.91
157.58	61.03	166.08	62.30	6.86	0.0393	60.80	24.36
Серия 2 (азот)		169.81	62.82	8.17	0.0815	62.66	25.79
256.13	70.46	173.55	63.32	8.72	0.103	64.52	27.19
260.43	70.70	177.28	63.80	9.99	0.158	66.38	28.56
264.69	70.92	181.02	64.25	10.58	0.1855	68.40	30.01
268.94	71.14	184.77	64.69	11.34	0.2238	70.10	31.21
273.14	71.34	188.52	65.11	12.44	0.2843	71.96	32.48
277.30	71.54	192.30	65.52	14.30	0.4030	73.82	33.71
281.41	71.72	196.08	65.91	15.02	0.4539	75.68	34.91
285.49	71.90	199.87	66.29	16.16	0.5466	77.54	36.08
289.51	72.07	204.09	66.69	17.68	0.6856	79.40	37.20
293.43	72.23	208.79	67.12	18.02	0.7197	81.26	38.26
297.17	72.38	213.46	67.52	19.88	0.9284	83.12	39.31
301.01	72.53	218.47	67.93	20.85	1.054	84.98	40.31
305.12	72.68	223.05	68.29	21.74	1.182	86.84	41.26
311.36	72.90	227.75	68.62	23.60	1.494	88.70	42.19
318.53	73.15	232.39	68.97	25.01	1.777	90.59	43.11
Серия 3 (азот)		237.00	69.27	27.19	2.316	32.90	4.395
91.66	43.60	241.64	69.52	29.18	2.924	34.76	5.298
94.08	44.64	246.18	69.88	30.36	3.343	36.62	6.306

Таблица 3. Экспериментальные значения теплоемкости $RuTe_2$, полученные методом ДСК

T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)	T, K	C_p, Дж/(K моль)
315.3	74.57	485.3	76.87	655.3	77.58	825.3	78.64
325.3	74.76	495.3	76.94	665.3	77.60	835.3	78.77
335.3	74.82	505.3	76.99	675.3	77.70	845.3	78.87
345.3	75.17	515.3	77.07	685.3	77.72	855.3	78.97
355.3	75.37	525.3	77.11	695.3	77.76	865.3	79.06
365.3	75.51	535.3	77.11	705.3	77.80	875.3	79.16
375.3	75.83	545.3	77.16	715.3	77.87	885.3	79.22
385.3	75.89	555.3	77.20	725.3	77.91	895.3	79.28
395.3	76.05	565.3	77.23	735.3	77.92	905.3	79.39
405.3	76.24	575.3	77.28	745.3	78.09	915.3	79.56
415.3	76.33	585.3	77.31	755.3	78.17	925.3	79.66
425.3	76.41	595.3	77.41	765.3	78.20	935.3	79.72
435.3	76.47	605.3	77.43	775.3	78.29	945.3	79.80
445.3	76.52	615.3	77.46	785.3	78.37	955.3	80.04
455.3	76.67	625.3	77.48	795.3	78.45	965.3	80.16
465.3	76.77	635.3	77.52	805.3	78.50		
475.3	76.84	645.3	77.58	815.3	78.54		

методом ДСК, приведены в табл. 3, зависимость $C_p^\circ = f(T)$ представлена на рис. 4. Отметим удовлетворительное согласование значений теплоемкости, определенных методом ДСК, с данными работы [4], которые выше 1000 K начинают несколько увеличиваться, а кривая теплоемкости – загибаться вверх.

Для обработки полученных экспериментальных данных использовали пакет программ NETZCH Proteus Thermal Analysis. После завершения эксперимента была проведена процедура согласования экспериментальных значений теплоемкости, полученных двумя калориметрическими методами (рис. 4). С целью сглаживания экспериментальных величин C_p, полученных на БКТ-3 и STA 449 F1 Jupiter, данные ДСК были уменьшены на 1.34 Дж/(K моль). Рентгенофазовый анализ образца после ДСК (рис. 5) показал соответствие чистому дителлуриду рутения, т.е. при нагревании до 965.3 K структура вещества не изменилась.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка параметров уравнений зависимости $C_p^\circ = f(T)$ проводилась на основе итогов измерений изобарной теплоемкости $RuTe_2$(кр.) методами АК и ДСК при температурах выше 298.15 K (см. табл. 2, 3), получены эмпирические коэффициенты уравнений Майера–Келли (1) [18] и Ходаковского (2) [19]:

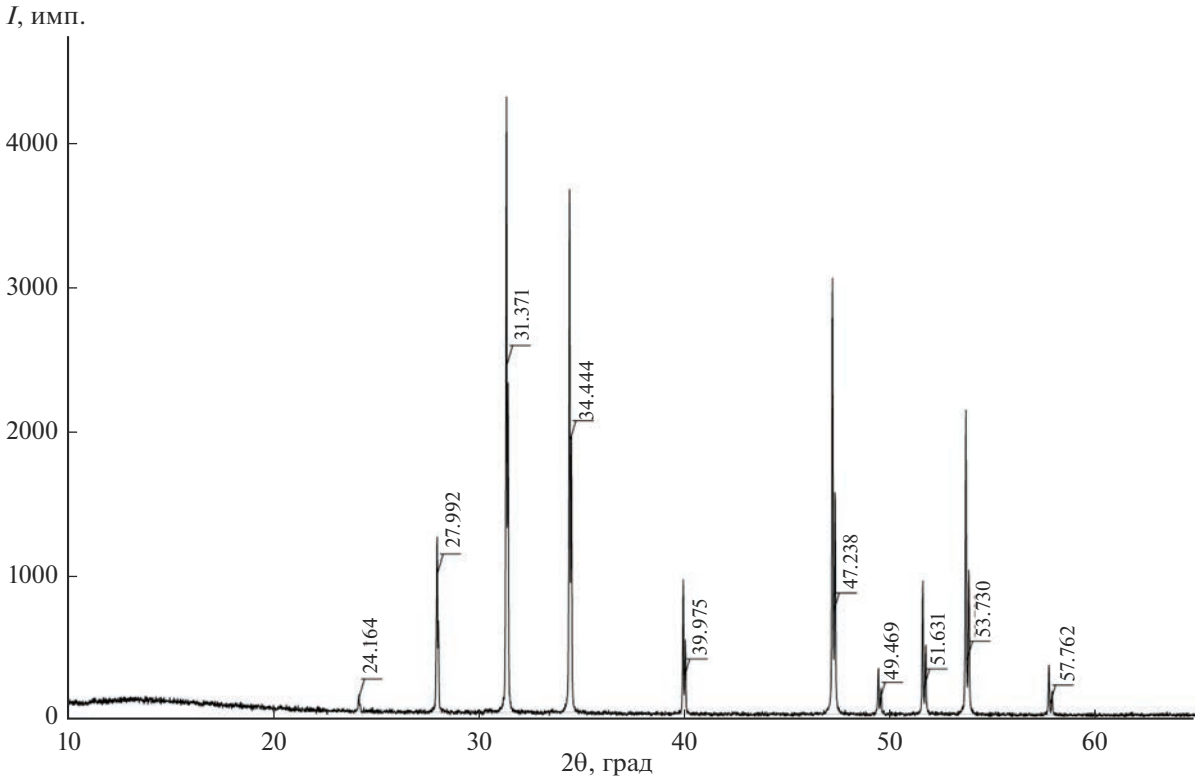

Рис. 5. Дифрактограмма кристаллического дителлурида рутения после проведения ДСК.

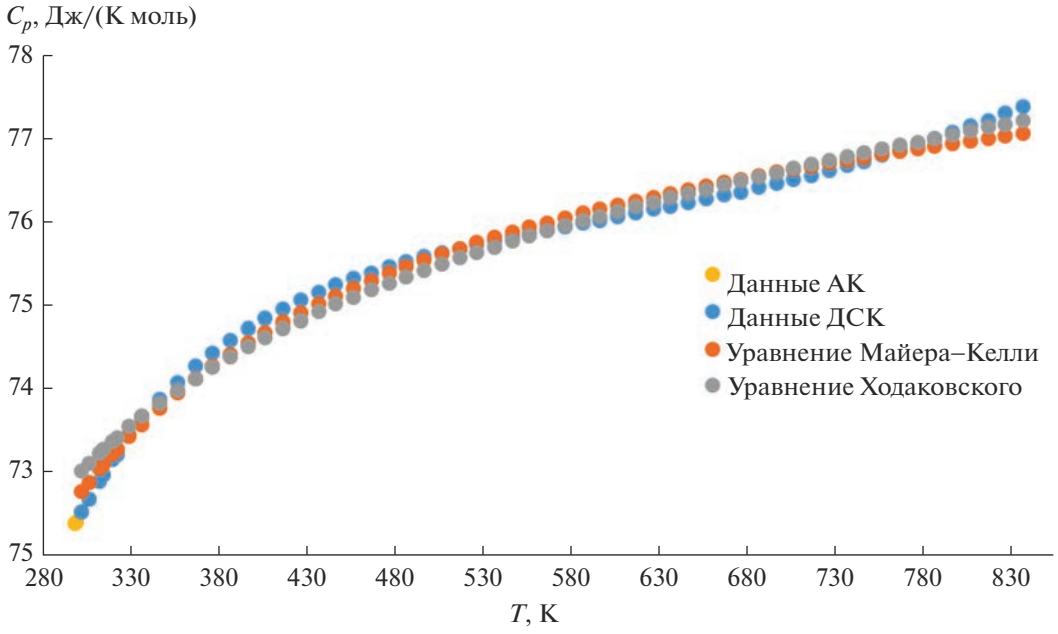

Рис. 6. Высокотемпературная зависимость теплоемкости для $RuTe_2$ (кр.).

$$C_p = (76.1 \pm 0.7) + (1.8 \pm 0.3)\times 10^{-3} T - (3.5 \pm 0.2)\times 10^{5} T^{-2}, \quad (1)$$

$$C_p = 3\mathrm{Rn}\left(1 - (3.4 \pm 0.2)\times 10^{3} T^{-2}\right) + (3.3 \pm 0.3)\times 10^{-3} T, \quad (2)$$

Таблица 4. Сглаженные значения теплоемкости и термодинамических функций $RuTe_2$

T, K	C_p°, Дж/(К моль)	S°, Дж/(К моль)	$H^\circ(T) - H^\circ(0)$, Дж/моль	Ф°, Дж/(К моль)
10	0.1615	0.04056	0.3209	0.008471
15	0.4756	0.1639	1.898	0.03742
20	0.9109	0.3547	5.266	0.09136
25	1.747	0.6378	11.69	0.1701
30	3.234	1.077	23.85	0.2818
35	5.472	1.734	45.32	0.4392
40	8.408	2.649	79.76	0.6553
45	11.89	3.836	130.3	0.9401
50	15.73	5.286	199.3	1.300
60	23.72	8.861	396.6	2.251
70	31.19	13.09	671.9	3.490
80	37.57	17.68	1017	4.975
90	42.79	22.42	1419	6.650
100	47.02	27.16	1869	8.464
110	50.47	31.80	2357	10.38
120	53.35	36.32	2877	12.35
130	55.80	40.69	3423	14.36
140	57.91	44.91	3991	16.40
150	59.76	48.97	4580	18.43
160	61.39	52.88	5186	20.46
170	62.84	56.64	5807	22.48
180	64.13	60.27	6442	24.48
190	65.28	63.77	7089	26.46
200	66.31	67.15	7747	28.41
210	67.23	70.40	8415	30.33
220	68.06	73.55	9092	32.22
230	68.80	76.59	9776	34.09
240	69.48	79.53	10470	35.91
250	70.09	82.38	11170	37.70
260	70.66	85.14	11870	39.49
270	71.18	87.82	12580	41.23
280	71.66	90.42	13290	42.95
290	72.10	92.94	14010	44.63
298.15	72.43	94.94	14600	45.97
300	72.51	95.39	14730	46.29
310	72.87	97.77	15460	47.90
320	73.20	100.1	16190	49.50
330	73.49	102.4	16930	51.05
340	73.75	104.6	17660	52.61
350	73.98	106.7	18400	54.12
400	74.78	116.6	22120	61.32
450	75.28	125.5	25870	67.97
500	75.60	133.4	29650	74.11
550	75.84	140.6	33430	79.85

Таблица 4. Окончание

T, K	C_p°, Дж/(K моль)	S°, Дж/(K моль)	$H^\circ(T) - H^\circ(0)$, Дж/моль	Ф°, Дж/(K моль)
600	76.05	147.2	37230	85.19
650	76.24	153.3	41040	90.19
700	76.49	159.0	44850	94.92
750	76.77	164.3	48690	99.36
800	77.10	169.2	52530	103.6
850	77.54	173.9	56400	107.6
900	78.01	178.4	60290	111.4
950	78.63	182.6	64200	115.0
965	78.83	183.8	65380	116.1

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(K моль); n – количество атомов в молекуле.

Отметим, что зависимости (1) и (2) удовлетворительно согласуются между собой и с экспериментальными данными (рис. 6).

Стандартные термодинамические функции рассчитаны по полученным температурным зависимостям изобарной теплоемкости: абсолютная энтропия $S^\circ(T)$, изменение энтальпии $H^\circ(T) - H^\circ(0)$, приведенная энергия Гиббса $\Phi^\circ(T) = -[G^\circ(T) - H^\circ(0)]/T$. Результаты расчетов в интервале температур 10–965 K приведены в табл. 4. При 298.15 K функции имеют следующие значения $C_p^\circ = 72.43 \pm \pm 0.14$ Дж/(K моль), $S^\circ = 94.94 \pm 0.19$ Дж/(K моль), $H^\circ(298.15\ \text{K}) - H^\circ(0) = 14.60 \pm 0.03$ кДж/моль, $\Phi^\circ = 45.97 \pm 0.09$ Дж/(K моль).

Используя полученную в настоящей работе величину $S^\circ(298.15)$ (табл. 4), справочные данные по абсолютной энтропии рутения и теллура [20], можно рассчитать значение энтропии образования $\Delta_f S^\circ(RuTe_2, \text{кр.}, 298.15) = -32.59 \pm 0.35$ Дж/(K моль).

Используя величину энтальпии образования $\Delta_f H^\circ(RuTe_2, \text{кр.}, 298.15) = -140.2$ кДж/моль [4], можно оценить энергию Гиббса образования $\Delta_f G^\circ(RuTe_2, \text{кр.}, 298.15) = -130.5 \pm 2.9$ кДж/моль, при этом значение энергии Гиббса образования для дителлурида рутения в литературных и справочных источниках отсутствует.

В заключение отметим, что полученные в настоящей работе термодинамические данные можно использовать при изучении системы Te–Ru для решения различных фундаментальных и прикладных задач.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводили с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта “Синтез и термодинамические свойства минералов, содержащих благородные металлы” (№ 22-23-00893).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тюрин А.В., Полотнянко Н.А., Тестов Д.С., Чареев Д.А., Хорошилов А.В.* Термодинамические функции дисульфида платины PtS_2 в широком интервале температур // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 2. С. 125–134. https://doi.org/10.31857/S0002337X20020177
2. *Полотнянко Н.А., Тюрин А.В., Чареев Д.А., Хорошилов А.В.* Теплоемкость и термодинамические функции PdS // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 7. С. 719–726. https://doi.org/10.31857/S0002337X20070131
3. https://catalogmineralov.ru/mineral/laurite.html
4. *Svendsen S.R.* Decomposition Pressures and Thermodynamic Properties of $RuTe_2$ // J. Chem. Thermodyn. 1977. V. 9. № 8. P. 789–800. https://doi.org/10.1016/0021-9614(77)90023-4
5. *Wang J., Han L., Huang B., Shao Q., Xin H.L., Huang X.* Amorphization Activated Ruthenium-Tellurium Nanorods for Efficient Water Splitting // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 5692. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13519-1
6. *Yang T.R., Huang Y.S., Chyan Y.K., Chang J.D.* Optical Absorption Studies of Pyrite-Type RuS_2, $RuSe_2$ and $RuTe_2$ Single Crystals // Czech. J. Phys. 1996. V. 46. P. 2541–2542. https://doi.org/10.1007/BF02570257
7. *Zhussupbekov K., Ansari L., McManus J.B., Zhussupbekova A., Shvets I.V., Duesberg G.S., Hurley P.K., Gity F., Ó Coileáin C., McEvoy N.* Imaging and Identification of Point Defects in $PtTe_2$ // npj 2D Mater. Appl. 2021. V. 5. P. 14. https://doi.org/10.1038/s41699-020-00196-8
8. *Foise J.W., Ezzaouia H., Gorochov O.* Crystal Growth and Characterization of $RuTe_2$ // Mater. Res. Bull. 1986. V. 21. № 1. P. 7–11.

9. *Chareev D.A., Evstigneeva P., Phuyal D., Man G.J., Rensmo H., Vasiliev A.N., Abdel-Hafiez M.* Growth of Transition-Metal Dichalcogenides by Solvent Evaporation Technique // Cryst. Growth Des. 2020. V. 20. № 10. P. 6930–6938. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00980
10. https://www.hypergrid.it/eshopen/
11. Program PCPDFWIN Version 2.02 Copyright © 1999.
12. http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/index.php
13. *Program TOtal Pattern Analysis Solutions.* © 2008 Bruker AXS
14. *Varushchenko R.M., Druzhinina A.I., Sorkin E.L.* Low Temperature Heat Capacity of 1-Bromoperfluorooctane // J. Chem. Thermodyn. 1997. V. 29. № 6. P. 623–637. https://doi.org/10.1006/jcht.1996.0173
15. http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Compositions
16. *Иориш В.С., Толмач П.И.* Методика и программа обработки экспериментальных данных по низкотемпературной теплоемкости с использованием аппроксимирующего сплайна // Журн. физ. химии. 1986. Т. 60. № 10. С. 2583–2587.
17. *Гурвич Л.В.* ИВТАНТЕРМО – автоматизированная система данных о термодинамических свойствах веществ // Вестн. АН СССР. 1983. № 3. С. 54–65.
18. *Maier C.G., Kelley K.K.* An Equation for the Representation of High-Temperature Heat Content Data // J. Am. Chem. Soc. 1932. V. 54. P. 3243–3246. https://doi.org/10.1021/ja01347a029
19. *Ходаковский И.Л.* О новых полуэмпирических уравнениях температурной зависимости теплоемкости и объемного коэффициента термического расширения минералов // Вестн. ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. С. 9001. https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG
20. *Медведев В.А., Бергман Г.А., Васильев В.П. и др.* Термические константы веществ (ред. Глушко В.П.) Вып. VI. М.: АН СССР. ВИНИТИ. 1972.