

УДК 536.631

СИНТЕЗ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ДИСЕЛЕНИДА ПЛАТИНЫ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

© 2025 г. А. В. Тюрин^{1, *}, Д. А. Чареев^{2, 3, 4},
Н. А. Полотнянко², Г. Е. Никифорова¹

¹Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

²Государственный университет “Дубна”,
ул. Университетская, 19, Дубна, Московская обл., 141982 Россия

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

⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062 Россия

*e-mail: tyurin@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 06.12.2024 г.

После доработки 26.12.2024 г.

Принята к публикации 27.12.2024 г.

Работа посвящена синтезу кристаллического диселенида платины PtSe_2 и изучению его термодинамических свойств. По результатам измерений изобарной теплоемкости PtSe_2 в интервале 5–813 К методами адиабатической и дифференциальной сканирующей калориметрии получены стандартные термодинамические функции: теплоемкость, энтропия, изменение энтальпии и приведенная энергия Гиббса. При 298.15 К рассчитаны $C_p^\circ = 70.43 \pm 0.35$ Дж/(К моль), $S^\circ = 100.8 \pm 0.5$ Дж/(К моль), $H^\circ(298.15 \text{ К}) - H^\circ(0) = 14.64 \pm 0.08$ кДж/моль, $\Phi^\circ = 51.74 \pm 0.26$ Дж/(К моль). С помощью литературных и справочных данных оценена энергия Гиббса образования $\Delta_f G^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ (кр.)}, 298.15 \text{ К}) = -109.1 \pm 2.0$ кДж/моль. Методом фрактальной обработки данных по теплоемкости подтверждена слоистая структура диселенида платины и оценена его температура Дебая, равная 350 ± 15 К.

Ключевые слова: теплоемкость, диселенид платины, халькогениды платиноидов, судовиковит, адиабатическая калориметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, энтропия

DOI: 10.31857/S0002337X25010028, EDN: KEKQAY

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает комплексные калориметрические исследования халькогенидов переходных металлов [1, 2] с использованием собственных синтезированных образцов — аналогов природных минералов, имеющих перспективы для применения. Одним из таких соединений является диселенид платины PtSe_2 , полупроводниковый двумерный материал со слоистой структурой [3–5], который может быть использован в фотокатализе и валиктронике [6].

Согласованные данные о термодинамических свойствах веществ системы Pt–Se практически отсутствуют в литературе. Следовательно, получение новых значений термодинамических функций для PtSe_2 , который встречается в природе в виде минерала судовиковита [7], представляет несомненный интерес для исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез и анализ диселенида платины. Согласно фазовой диаграмме системы Pt–Se [8], диселенид платины является строго стехиометричной фазой, которая конгруэнтно плавится при температуре 1245°C. Синтез образца проводили в вакуумированных (10^{-4} бар) ампулах из кварцевого стекла [9] из простых веществ, взятых в стехиометрическом соотношении с небольшим избытком селена. В качестве реактивов использовали платиновые пластины (чистота 99.95%) и кристаллический селен (чистота 99.999%). Ампулы нагревали до 550°C и выдерживали при этой температуре в течение недели. В результате платина и селен образовывали спек, а избыточный селен конденсировался в холодной части ампулы. Затем ампулу извлекали, вещество перетирали в агатовой ступке и снова, вместе с остатками селена, запаивали в ампулы под вакуумом и отжигали при 450°C в течение месяца. Зная изначальные

массы платины и селена и взвесив непрореагировавшую селеновую каплю, определили, что получившееся вещество имеет состав, очень близкий к стехиометрическому ($\text{PtSe}_{2.018}$).

Кристаллическая структура была подтверждена методом рентгеновской порошковой дифрактометрии. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (CuK_α -излучение). Фазовая чистота образца определялась сравнением с базой данных PDF2.

Измерения изобарной теплоемкости. Для изучения низкотемпературной теплоемкости PtSe_2

использовали адиабатический вакуумный калориметр БКТ-3 (ИП Малышев А.В., Московская обл.).

Методом адиабатической калориметрии (АК) теплоемкость измеряли в интервале 4.81–349.40 К с шагом по температуре 0.5–1.0 К в области 14–80 К и 1.0–4.0 К выше 80 К. Кривая температурной зависимости теплоемкости определена в 152 экспериментальных точках (табл. 1). Все измерения на установке проводились автоматически и контролировались компьютерно-измерительной системой, в состав которой входил блок аналогового регулирования и сбора дан-

Таблица 1. Экспериментальные значения теплоемкости PtSe_2 в низкотемпературной области

| T, K | $C_p,$ Дж/(К моль) | T, K | $C_p,$ Дж/(К моль) | T, K | $C_p,$ Дж/(К моль) | T, K | $C_p,$ Дж/(К моль) |
|----------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Серия 1 — азот | | 191.99 | 64.78 | 339.66 | 71.28 | 38.02 | 13.28 |
| 79.09 | 37.11 | 195.29 | 65.13 | 344.61 | 71.33 | 39.37 | 14.07 |
| 81.78 | 38.48 | 198.59 | 65.38 | 349.40 | 71.41 | 40.99 | 15.02 |
| 83.81 | 39.43 | 202.31 | 65.65 | Серия 2 — гелий | | 42.61 | 15.93 |
| 85.85 | 40.49 | 206.39 | 66.01 | 4.81 | 0.0557 | 44.02 | 16.58 |
| 87.89 | 41.48 | 210.45 | 66.32 | 4.98 | 0.0647 | 45.58 | 17.53 |
| 89.92 | 42.43 | 214.48 | 66.52 | 5.08 | 0.0724 | 46.93 | 18.43 |
| 91.96 | 43.43 | 218.47 | 66.81 | 5.35 | 0.0944 | 48.55 | 19.29 |
| 94.00 | 44.11 | 222.40 | 67.03 | 5.62 | 0.114 | 50.06 | 20.21 |
| 96.04 | 44.99 | 226.28 | 67.33 | 5.89 | 0.143 | 51.53 | 21.09 |
| 98.08 | 45.71 | 230.01 | 67.55 | 6.43 | 0.193 | 53.14 | 22.11 |
| 100.12 | 46.55 | 233.91 | 67.74 | 6.94 | 0.258 | 54.76 | 23.03 |
| 102.78 | 47.46 | 237.86 | 68.01 | 7.51 | 0.315 | 56.11 | 23.89 |
| 106.06 | 48.78 | 241.81 | 68.17 | 8.32 | 0.432 | 57.73 | 24.87 |
| 109.35 | 49.89 | 245.64 | 68.39 | 9.22 | 0.533 | 59.35 | 25.85 |
| 112.64 | 50.84 | 249.50 | 68.65 | 10.09 | 0.6805 | 60.84 | 26.71 |
| 115.93 | 51.75 | 253.24 | 68.79 | 10.86 | 0.7721 | 62.29 | 27.58 |
| 119.21 | 52.74 | 256.94 | 68.99 | 11.83 | 0.9799 | 63.78 | 28.51 |
| 122.51 | 53.66 | 260.51 | 69.12 | 12.70 | 1.134 | 65.25 | 29.42 |
| 125.81 | 54.55 | 264.04 | 69.28 | 13.57 | 1.367 | 66.72 | 30.28 |
| 129.11 | 55.39 | 267.52 | 69.44 | 14.53 | 1.591 | 68.26 | 31.17 |
| 132.42 | 56.11 | 270.95 | 69.59 | 15.34 | 1.845 | 69.88 | 32.05 |
| 135.72 | 56.87 | 274.32 | 69.67 | 16.15 | 2.212 | 71.23 | 32.85 |
| 139.03 | 57.47 | 277.63 | 69.79 | 17.05 | 2.499 | 73.12 | 33.89 |
| 142.34 | 58.03 | 280.88 | 69.85 | 17.92 | 2.901 | 75.05 | 34.98 |
| 145.66 | 58.78 | 284.08 | 69.99 | 18.79 | 3.204 | 77.08 | 36.01 |
| 148.97 | 59.39 | 286.50 | 70.13 | 19.66 | 3.609 | 79.06 | 37.11 |
| 152.28 | 59.82 | 289.58 | 70.21 | 20.74 | 4.226 | 81.22 | 38.17 |
| 155.59 | 60.41 | 292.60 | 70.31 | 22.09 | 4.914 | 83.17 | 39.27 |
| 158.90 | 60.99 | 295.55 | 70.41 | 23.71 | 5.707 | 85.27 | 40.19 |
| 162.21 | 61.38 | 298.44 | 70.52 | 25.07 | 6.487 | 87.43 | 41.15 |
| 165.52 | 61.85 | 301.26 | 70.58 | 26.54 | 7.217 | 89.59 | 42.19 |
| 168.83 | 62.24 | 303.70 | 70.63 | 27.76 | 7.899 | 91.48 | 43.01 |
| 172.13 | 62.67 | 307.71 | 70.69 | 29.11 | 8.554 | 93.61 | 44.02 |
| 175.44 | 63.12 | 312.73 | 70.75 | 30.46 | 9.262 | 95.63 | 44.74 |
| 178.75 | 63.58 | 318.40 | 70.76 | 32.08 | 10.21 | 97.69 | 45.63 |
| 182.06 | 63.85 | 323.93 | 71.01 | 33.58 | 11.01 | 99.85 | 46.48 |
| 185.37 | 64.22 | 329.31 | 71.13 | 35.05 | 11.72 | | |
| 188.68 | 64.41 | 334.56 | 71.21 | 36.40 | 12.43 | | |

ных. Использовали калориметрическую ампулу в виде тонкостенного цилиндрического титанового сосуда (внутренний объем 1 см³, масса ~1.6 г), завинчивающегося бронзовой крышкой с индиевым уплотнением для герметизации. Температура измерялась железо-родиевым термометром сопротивления ($R \approx 100$ Ом). Чувствительность термометрической схемы 1×10^{-3} К, абсолютная погрешность измерений температуры $\pm 5 \times 10^{-3}$ К в соответствии с МТШ-90. Детальная конструкция и принцип работы калориметра приведены в работах [10, 11]. Надежность измерительной процедуры была проверена путем измерения теплоемкости меди квалификации “ос.ч.”, стандартных синтетического корунда [12] и бензойной кислоты марки К-2 [13]. Навеска образца составляла 1.20652 г. Молекулярная масса принималась равной теоретической — 353.026 г/моль [14].

Высокотемпературные измерения теплоемкости образца проводили на установке синхронного термического анализа NETZSCH DSC 404 F1 Pegasus (Германия) в атмосфере газообразного аргона с использованием калибровки по температуре плавления металлических стандартов, 1 шаг — 5 К, погрешность измерений 2%. При измерениях теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) от 318 до 813 К расчет C_p осуществляли с помощью метода отношений, при этом в качестве эталона использовали сапфир SRM 720 [15]. Для обработки полученных экспериментальных данных применяли пакет программ NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным рентгенофазового анализа, полученный образец диселенида платины не содержал примесных фаз. Дифрактограмма PtSe₂ была проиндексирована в гексагональной структуре (пр.гр. $P-3m$) с параметрами кристаллической решетки $a = 3.7274(2)$ Å, $c = 5.0842(3)$ Å, $V = 61.174(6)$ Å³ (рис. 1).

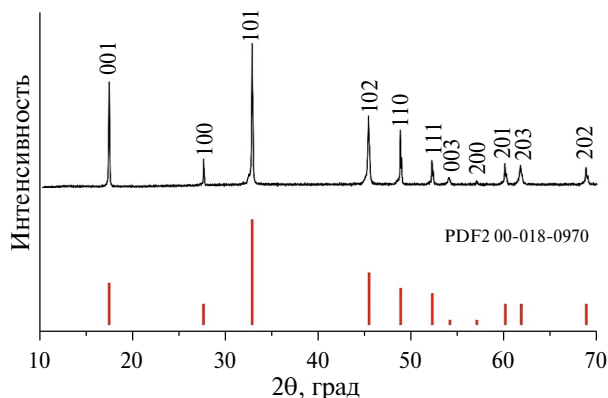


Рис. 1. Дифрактограмма образца PtSe₂ (приведена штрих-диаграмма эталонного образца).

Температурная зависимость теплоемкости PtSe₂ в области низких и высоких температур представляет собой гладкую, монотонно возрастающую кривую без видимых аномалий и фазовых переходов (рис. 2). Кривая теплоемкости, полученная с помощью ДСК, плавно продолжает кривую с результатами адиабатических исследований (на участке 318–349 К очень близки значения как C_p , так и первой производной теплоемкости). Экспериментальная зависимость теплоемкости PtSe₂ в интервале 4.81–813 К была описана методом наименьших квадратов с помощью аппроксимирующего полинома [16]:

$$C_p(T) = \sum_0^{14} A_j U^j, \quad (1)$$

где $U = \ln\left(\frac{T}{400}\right)$ — логарифмическая подстановка, A — коэффициенты полинома.

Рассчитанные коэффициенты уравнения (1), приведенные в табл. 2, позволили определить стандартную изобарную теплоемкость PtSe₂ при 298.15 К, равную 70.43 Дж/(К моль). Рассчитанное по правилу аддитивности значение $C_p(298.15) = 76.57$ Дж/(К моль) отличается от экспериментального на 8.5% при погрешности эксперимента $\pm 3\%$. По этой причине расчет по методу Неймана–Коппа нельзя использовать для оценки высокотемпературной теплоемкости халькогенидов платины.

Попытки описать высокотемпературную теплоемкость диселенида платины с помощью наиболее часто используемого уравнения Майера–Келли [17] также не увенчались успехом, поскольку выше 600 К кривая $C_p(T)$ начинает загигаться вверх (рис. 2). Аналогичная ситуация наблюдалась и у других халькогенидов [18–22]. По этой причине для описания теплоемкости $C_p = f(T)$ было использовано более сложное выражение

$$C_p = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3 + e \times T^{-2}. \quad (2)$$

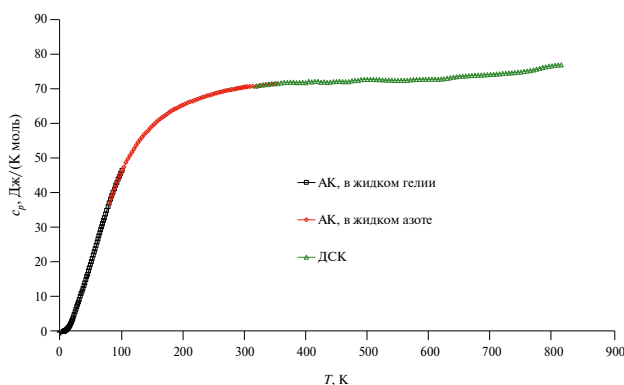


Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости образца PtSe₂.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (1)

| j | A_j Дж/(К моль) |
|-----|----------------------------------|
| 0 | 0.719872×10^2 |
| 1 | 0.271527×10^1 |
| 2 | -0.672551×10^1 |
| 3 | 0.10074994×10^2 |
| 4 | 0.10709153×10^2 |
| 5 | -0.17558198×10^1 |
| 6 | -0.749015804×10^1 |
| 7 | 0.5464309135×10^1 |
| 8 | $0.12096791996 \times 10^2$ |
| 9 | $0.53443630116 \times 10^1$ |
| 10 | $-0.61575445424 \times 10^0$ |
| 11 | $-0.1348111361965 \times 10^1$ |
| 12 | $-0.525756104987 \times 10^0$ |
| 13 | $-0.1010766243617 \times 10^0$ |
| 14 | $-0.100001312081 \times 10^{-1}$ |
| 15 | $-0.40775988898 \times 10^{-3}$ |

Коэффициенты уравнения (2) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения (2), описывающего зависимость $C_p = f(T)$ в области 298–813 К

| Коэффициент | Значение |
|-------------|------------------------------|
| a | 71.37342087 |
| b | 0.03070095958 |
| c | $-8.82517975 \times 10^{-5}$ |
| d | $7.359309462 \times 10^{-8}$ |
| e | -363690.0394 |

Расчет стандартных термодинамических функций. По полученным экспериментальным данным рассчитаны стандартные термодинамические функции $C_p^\circ(T)$, $S^\circ(T)$, $H^\circ(T) - H^\circ(0)$ и $\Phi^\circ(T)$ в области от 5 до 800 К (табл. 4). Отметим, что значения рассчитанных в настоящей работе термодинамических функций для PtSe_2 (кр.) определены впервые.

Таблица 4. Сглаженные значения теплоемкости и термодинамических функций PtSe_2

| T , К | C_p° , Дж/(К моль) | S° , Дж/(К моль) | $H^\circ(T) - H^\circ(0)$, Дж/моль | Φ° , Дж/(К моль) |
|---------|------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|
| 5 | 0.0307 | 0.0102 | 0.0384 | 0.00256 |
| 10 | 0.6912 | 0.2140 | 1.689 | 0.04511 |
| 15 | 1.728 | 0.6629 | 7.400 | 0.170 |
| 20 | 3.847 | 1.429 | 20.98 | 0.380 |
| 25 | 6.439 | 2.563 | 46.64 | 0.697 |
| 30 | 9.055 | 3.968 | 85.39 | 1.122 |
| 35 | 11.68 | 5.560 | 137.2 | 1.640 |
| 40 | 14.40 | 7.296 | 202.4 | 2.237 |
| 45 | 17.24 | 9.155 | 281.4 | 2.901 |
| 50 | 20.20 | 11.12 | 374.9 | 3.624 |
| 60 | 26.25 | 15.34 | 607.1 | 5.221 |
| 70 | 32.15 | 19.83 | 899.4 | 6.984 |
| 80 | 37.57 | 24.49 | 1249 | 8.880 |
| 90 | 42.37 | 29.20 | 1649 | 10.88 |
| 100 | 46.52 | 33.88 | 2094 | 12.94 |
| 110 | 50.06 | 38.48 | 2577 | 15.06 |
| 120 | 53.05 | 42.97 | 3093 | 17.20 |
| 130 | 55.57 | 47.32 | 3637 | 19.35 |
| 140 | 57.71 | 51.52 | 4203 | 21.50 |
| 150 | 59.52 | 55.56 | 4790 | 23.63 |
| 160 | 61.07 | 59.46 | 5393 | 25.75 |
| 170 | 62.41 | 63.20 | 6010 | 27.84 |
| 180 | 63.57 | 66.80 | 6640 | 29.91 |
| 190 | 64.58 | 70.26 | 7281 | 31.94 |
| 200 | 65.47 | 73.60 | 7931 | 33.94 |

Таблица 4. Окончание

| T, K | $C_p^\circ,$ Дж/(К моль) | $S^\circ,$ Дж/(К моль) | $H^\circ(T) - H^\circ(0),$ Дж/моль | $\Phi^\circ,$ Дж/(К моль) |
|--------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 210 | 66.26 | 76.81 | 8590 | 35.91 |
| 220 | 66.96 | 79.91 | 9256 | 37.84 |
| 230 | 67.59 | 82.90 | 9929 | 39.73 |
| 240 | 68.15 | 85.79 | 10610 | 41.58 |
| 250 | 68.66 | 88.59 | 11290 | 43.43 |
| 260 | 69.11 | 91.29 | 11980 | 45.21 |
| 270 | 69.51 | 93.90 | 12670 | 46.98 |
| 280 | 69.87 | 96.44 | 13370 | 48.69 |
| 290 | 70.20 | 98.89 | 14070 | 50.38 |
| 298.15 | 70.43 | 100.8 | 14640 | 51.74 |
| 300 | 70.48 | 101.3 | 14780 | 52.01 |
| 310 | 70.74 | 103.6 | 15480 | 53.65 |
| 320 | 70.96 | 105.8 | 16190 | 55.25 |
| 330 | 71.16 | 108.0 | 16900 | 56.82 |
| 340 | 71.33 | 110.2 | 17610 | 58.37 |
| 350 | 71.48 | 112.2 | 18330 | 59.86 |
| 400 | 71.99 | 121.8 | 21920 | 67.01 |
| 500 | 72.40 | 137.9 | 29140 | 79.64 |
| 600 | 72.91 | 151.2 | 36400 | 90.49 |
| 700 | 74.12 | 162.5 | 43740 | 99.99 |
| 800 | 76.57 | 172.5 | 51260 | 108.4 |

Абсолютная энтропия $PtSe_2$ при 298.15 К (табл. 4), а также справочные величины энтропии платины и селена [23] позволили рассчитать энтропию образования диселенида платины $\Delta_r S^\circ(PtSe_2 \text{ (кр.)}, 298.15) = -25.4 \pm 0.5$ Дж/(К моль). Используя это значение и энтальпию образования $\Delta_r H^\circ(PtSe_2 \text{ (кр.)}, 298.15) = -116.7 \pm 1.6$ кДж/моль, определенную Столяровой и Осадчим [24], оценили энергию Гиббса образования $PtSe_2$ при 298.15 К -109.1 ± 2.0 кДж/моль. Данная величина в справочных изданиях отсутствует.

Фрактальная размерность и характеристическая температура. Температура Дебая, являющаяся одной из важнейших характеристик твердого тела, может быть определена на основании данных по теплоемкости. Схема расчета этой величины для соединений PtS_2 , $PtSe_2$ и $PtTe_2$ достаточно проста, поскольку их колебательный спектр не содержит частот внутриионных колебаний, а измеренная теплоемкость может быть представлена в виде суммы вкладов изохорной теплоемкости C_V (в нашем случае это вклад, учитывающий решеточные колебания) и работы расширения решетки $C_p - C_V$.

Приближение Дебая, описываемое уравнением для теплоемкости при постоянном объеме, пригодно лишь для изотропных сред. В случае слоистых структур целесообразнее применять выражение вида [25]

$$C_V = 3Rr \left[D(D+1) \left(\frac{T}{\Theta} \right)^D \int_0^{\Theta/T} \frac{x^D dx}{e^x - 1} - \frac{D\Theta/T}{e^{\Theta/T} - 1} \right], \quad (3)$$

где r — количество атомов в элементарной ячейке.

Необходимо учитывать, что корректное применение данной модели возможно только в том случае, когда вещество не претерпевает фазовых превращений в изучаемом диапазоне температур, поскольку вклад аномальной теплоемкости может привести к большим ошибкам расчета температуры Дебая.

Как уже отмечалось, диселенид платины имеет слоистую структуру, поэтому его фрактальная размерность (D) будет близка к двум [26]. На рис. 3 приведены температурные зависимости

фрактальной размерности, все кривые стремятся к значению $D = 2.3$, что также подтверждает слоистую структуру соединения, при этом между слоями действуют слабые ван-дер-ваальсовы или ковалентные взаимодействия [27]. Ориентируясь на это значение фрактальной размер-

ности, мы оценили характеристическую температуру Θ (рис. 4) — 350 ± 15 К. Нелинейность графика при низких температурах обусловлена неучтенными квантовыми эффектами и использованием в расчетах изobarной теплоемкости вместо изохорной.

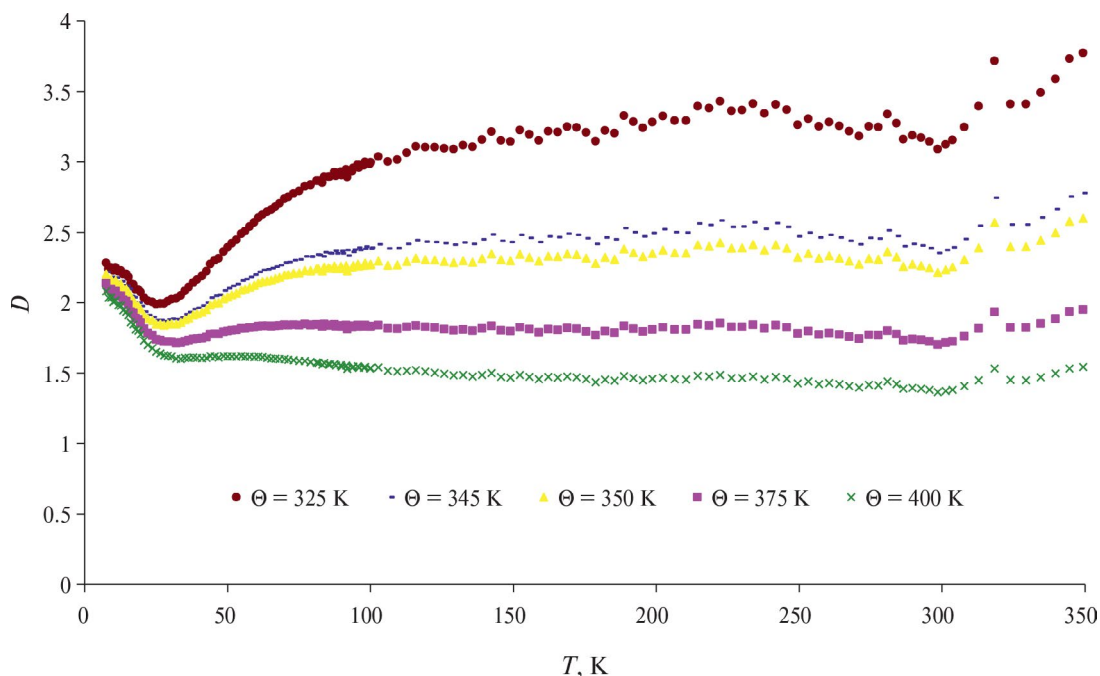


Рис. 3. Температурные зависимости фрактальной размерности $D = f(T)$ при различных фиксированных характеристических температурах Дебая Θ .

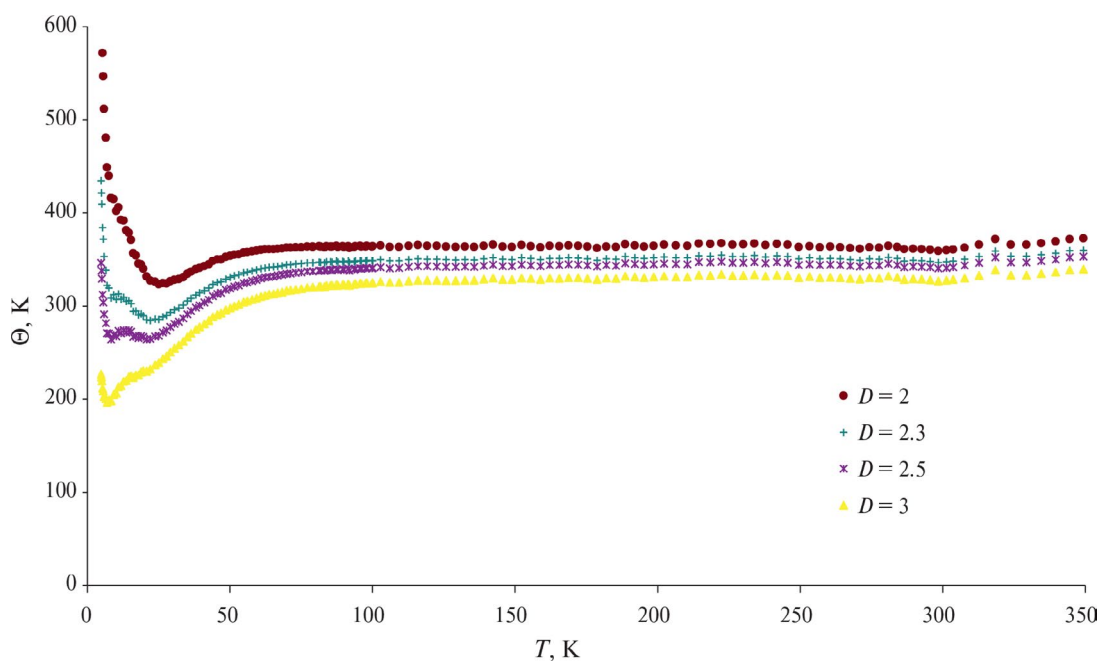


Рис. 4. Температурные зависимости характеристической температуры Дебая $\Theta = f(T)$ при различных фиксированных фрактальных размерностях: $D = 2, 2.3, 2.5, 3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные по измерению изобарной теплоемкости PtSe_2 в широком интервале температур двумя калориметрическими методами позволили рассчитать для диселенида платины значения стандартных термодинамических функций (теплоемкости, энтропии, изменения энтальпии и приведенной энергии Гиббса, фактальной размерности, температуры Дебая). Используя собственное значение абсолютной энтропии при 298.15 К, с помощью литературных и справочных данных оценена стандартная энергия Гиббса образования $\Delta_f G^\circ(\text{PtSe}_2 \text{ кр.}, 298.15 \text{ К}) = -109.1 \pm 2.0 \text{ кДж/моль}$.

Результаты настоящей работы можно использовать при изучении системы Pt–Se для анализа геохимических и прикладных исследований, в частности, стадий месторождений платиновых минералов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Синтез диселенида платины выполнен в рамках темы FMUF-2022-0002 НИР ИЭМ РАН и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Уральского федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030). Измерение теплоемкости диселенида платины выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чареев Д.А., Тюрин А.В., Полотнянко Н.А., Чарева П.В. Синтез и термодинамические функции дителлурида платины в низкотемпературной области // Неорган. Материалы. 2023. Т. 59. № 8. С. 859–865.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23080031>
2. Тюрин А.В., Полотнянко Н.А., Тестов Д.С., Чарева 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>
3. Kjekshus A. On the reaction between platinum and sulfur, selenium or tellurium. I. Preparation of PtS , $\text{PtSe}_{0.8}$ and PtTe // Acta Chem. Scand. 1961. V. 15. P. 159–166.
<https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.15-0159>
4. Furuseth S., Selte K., Kjekshus A. Redetermined crystal structures of NiTe_2 , PdTe_2 , PtS_2 , PtSe_2 and PtTe_2 // Acta Chem. Scand. 1965. V. 19. № 1. P. 257–258.
<https://doi.org/10.3891/ACTA.CHEM.SCAND.19-0257>
5. Wang Y. et al. Monolayer PtSe_2 , a new semiconducting transition-metal-dichalcogenide, epitaxially grown by direct selenization of Pt // Nano Lett. 2015. V. 15. № 6. P. 4013–4018.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00964>
6. Wang G. et al. Layered PtSe_2 for sensing, photonic, and (opto-) electronic applications // Adv. Mater. 2021. V. 33. № 1. P. 2004070.
<https://doi.org/10.1002/adma.202004070>
7. Полеховский Ю.С., Тарасова И.П., Нестеров А.П., Пахомовский Я.А., Бахчисарайцев А.Ю. Судовиковит PtSe_2 — новый селенид платины из метасоматитов Южной Карелии // Докл. АН. 1997. Т. 354. № 1. С. 82–85.
8. Richter K.W., Ipser H. Transition metal-chalcogen systems XI: the platinum-selenium phase diagram // J. Phase Equilib. 1994. V. 15. P. 165–170.
<https://doi.org/10.1007/BF02646360>
9. Kullerud G. Experimental techniques in dry sulfide research // Research Techniques for High Pressure and High Temperature / Ed. Ulmer G.C. N.Y.: Springer, 1971. P. 288–315.
10. 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>
11. Мальшев В.В., Мильнер Г.А., Соркин Е.Л., Шибакин В.Ф. Автоматический низкотемпературный калориметр // Приборы и техн. экспер. 1985. Т. 28. Вып. 6. С. 195–197.
12. Archer D.G. Thermodynamic properties of synthetic sapphire (Al_2O_3), standard reference material 720 and the effect of temperature scale on thermodynamic properties // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1993. V. 22. P. 1441–1453.
<https://doi.org/10.1063/1.555931>
13. Bissengaliyeva M.R., Gogol D.B., Taymasova S.T., Bekturganov N.S. Measurement of heat capacity by adiabatic calorimetry and calculation of thermodynamic functions of standard substances: copper, benzoic acid, and heptane (for calibration of an adiabatic calorimeter) // J. Chem. Eng. Data 2011. V. 56. P. 195–204.
<https://doi.org/10.1021/jc100658y>
14. <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Compositions>
15. Ditmars D.A., Ishihara S., Chang S.S., Bernstein G. Enthalpy and Heat-Capacity Standard Reference Material: Synthetic Sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) from 10

- to 2250 K // J. Res. Natl. Bur. Stand. 1982. V. 87. № 2. P. 159–163.
16. Гуревич В.М., Хлюстов В.Г. Калориметр для определения низкотемпературной теплоемкости минералов. Теплоемкость кварца в интервале 9–300 К // Геохимия. 1979. Т. 17. № 6. С. 829.
17. 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>
18. Пашилкин А.С., Малкова А.С., Жаров В.В. Теплоемкость монотеллуридов галлия и индия // Журн. физ. химии. 1989. Т. 63. С. 1621.
19. Svendsen S.R., Gronvold F., Westrum E.F. Thermodynamic properties of RuSe₂ from 5 to 1500 K // J. Chem. Thermodyn. 1987. V. 19. P. 1009–1022.
[https://doi.org/10.1016/0021-9614\(87\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0021-9614(87)90011-5)
20. Svendsen S.R. Decomposition pressures and thermodynamic properties of RuTe₂ // J. Chem. Thermodyn. 1977. V. 9. № 8. P. 789–800.
[https://doi.org/10.1016/0021-9614\(77\)90023-4](https://doi.org/10.1016/0021-9614(77)90023-4)
21. Тюрин А.В., Чареев Д.А., Полотнянко Н.А., Хорошилов А.В., Пузанова И.Г., Згурский Н.А. Синтез и термодинамические функции дихалькогенидов рутения в широком интервале температур // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 11. С. 1272–1282.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23110155>
22. Полотнянко Н.А., Тюрин А.В., Чареев Д.А., Хорошилов А.В., Попов Е.А. Синтез и термодинамические свойства дителлурида рутения // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 10. С. 1095–1104.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X2310010X>
23. Barin I. Thermochemical Data of Pure Substances // VCH. 1995. V. 2. 1885 p.
24. Столярова Т.А., Осадчий Е.Г. Стандартные энтальпии образования селенидов платины PtSe₂ и PtSe_{0.8} (Pt₅Se₄) из элементов // Геохимия. 2010. № 1. С. 98–100.
25. Тюрин А.В., Изотов А.Д., Гавричев К.С., Зломанов В.П. Описание теплоемкости полупроводниковых соединений A^{III}B^{VI} с использованием фрактальной модели // Неорган. материалы. 2014. Т. 50. № 9. С. 979–982.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X14090164>
26. Шебершинева О.В., Изотов А.Д., Гавричев К.С., Лазарев В.Б. Метод обработки данных низкотемпературной калориметрии с учетом мультифрактальности колебательных состояний атомов // Неорган. материалы. 1996. Т. 32. № 1. С. 36–40.
27. Изотов А.Д., Гавричев К.С., Лазарев В.Б., Шебершинева О.В. Температурная зависимость теплоемкости веществ с мультифрактальной структурой // Неорган. материалы. 1994. Т. 30. № 4. С. 449–456.