

Растворимость теллура в кристаллах TlGaTe_2 , TlInTe_2 и электрофизические свойства твердых растворов

© А.И. Наджафов^{1,2}, Н.А. Алиева², К.Г. Халилова¹

¹ Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

² Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

E-mail: a.najafov@mail.ru

(Поступила в Редакцию 16 августа 2017 г.
В окончательной редакции 20 февраля 2018 г.)

Комплексными методами физико-химического анализа исследованы сплавы системы $\text{TlGaTe}_2\text{—Te}$ и $\text{TlInTe}_2\text{—Te}$, в которых обнаружена область растворимости теллура, доходящая до 5.0 ат.%. Исследованы температурные зависимости параметров решетки и электропроводности монокристаллов TlGaTe_{2+x} и TlInTe_{2+x} в разных кристаллографических направлениях. В твердых растворах TlGaTe_{2+x} , TlInTe_{2+x} обнаружен и интерпретирован фазовый переход при температуре 498 К.

DOI: 10.21883/FTT.2018.09.46380.331

1. Введение

В последнее время суперионные проводники становятся объектами интенсивного исследования в связи с использованием их в химических источниках тока, датчиках концентрации, энергоемких конденсаторах и т.д. В связи с этим одним из важных направлений физики и химии конденсированного состояния является целенаправленное изменение электрофизических свойств ионных проводников посредством легирования их добавками разных атомов.

В ряде работ [1–5] было проведено легирование суперионных кристаллов разными веществами с целью повышения проводимости. Как известно, проводимость кристалла является структурно-чувствительным свойством и присутствующие в структуре катионные вакансии, междоузельные ионы, а также внедренные атомы могут сильно изменять значение этого параметра. В работе [6] было показано, что в результате легирования атомами Сг проводимость кристаллов $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ в суперионной фазе увеличилась на порядок.

Известно, что температура фазового перехода в суперионную фазу у многих ионных проводников является достаточно высокой ($T > 400$ К), что ограничивает область их применения. В работе [7] легирование кристаллов AgI было проведено с целью изменения температуры фазового перехода в суперионную фазу.

В работе [8] проведено теоретическое исследование основных физических свойств суперионного проводника AgI легированных изо- и гетеровалентными примесями. Показана возможность предсказания знака изменения температуры суперионного проводника при добавлении легирующей примеси того или иного типа. Результаты работы [8] могут быть использованы для направленного синтеза суперионных материалов с необходимыми свойствами.

В работе [9] рассмотрены результаты исследований композиционных ионных проводников. Уделено внимание моделям, описывающим поверхностное разупорядочение и механизм образования дефектов. Обсуждены методы расчета физико-химических характеристик композитов, термодинамическая стабильность, особенности генезиса морфологии нанокомпозитов.

Ионная проводимость обнаружена во многих соединениях таллия [10–13], одними из которых являются соединения TlGaTe_2 и TlInTe_2 . TlGaTe_2 и TlInTe_2 являются представителями класса тройных соединений типа $A^3B^3C_2^6$ (где А–Тl; В–Ga, In; С–S, Se, Te), кристаллизующихся в тетрагональной сингонии (структурный тип TlSe , пр. гр. $I4/mcm$) и имеющие следующие кристаллографические параметры: $a = 8.429 \text{ \AA}$; $c = 6.865 \text{ \AA}$; $c/a = 1.227$; $Z = 4$; $d = 7.21 \text{ g/cm}^3$ и $a = 8.494 \text{ \AA}$; $c = 7.181 \text{ \AA}$; $c/a = 0.845$; $Z = 4$; $d = 7.36 \text{ g/cm}^3$ [14] соответственно. Химическая связь в кристаллах TlGaTe_2 имеет ионно-ковалентный характер [15]. Кристаллы соединений TlGaTe_2 и TlInTe_2 являются устойчивыми в воздухе и обладают конгруэнтным характером плавления, температура плавления составляет 1046 К для TlGaTe_2 и 1045 К для TlInTe_2 [15,16].

Кристаллы соединений $A^3B^3C_2^6$ являются дефектными, концентрация дефектов в них составляет $\sim 10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [17]. Электрофизические свойства кристаллов $A^3B^3C_2^6$ являются чувствительными к присутствию разного рода дефектов (вакансии, внедренные атомы и т.д.). В связи с обнаружением в кристаллах TlGaTe_2 и TlInTe_2 ионной проводимости при температурах выше 300 К [18–21], исследования влияния разного рода примесей на электрофизические свойства являются актуальными.

Физико-химические исследования показали, что соединения $A^3B^3C_2^6$ растворяют в себе сверхстехиометрическое количество халькогенов [22–23].

В результате исследования фрагментов диаграмм состояния $TlS-S$, $TlSe-Se$, а также $TlInSe_2-Se$, было показано, что на основе соединений TlS , $TlSe$ и $TlInSe_2$ имеет-ся область растворимости соответствующих халькогенов в количестве до 5.0 ат.%. Было также показано, что избыточное количество растворенного халькогена приводит к структурным фазовым превращениям [22–24].

Растворимость теллура в кристаллах $TlGaTe_2$ и в $TlInTe_2$ до настоящего времени не исследована, в то же время она представляет как научный, так и практический интерес.

В настоящей работе представлены результаты комплексного физико-химического исследования сплавов системы $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ со стороны тройных соединений, а также электрических свойств обнаруженных твердых растворов.

2. Методика эксперимента

Сплавы системы $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ были синтезированы с интервалом 1.0 ат.% в вакуумированных кварцевых сосудах Степанова с использованием метода прямого одностепенного синтеза. В качестве исходных компонентов использовались поликристаллические $TlGaTe_2$, $TlInTe_2$ и теллур. Температура в печи поднималась до $T = 1150$ К со скоростью ~ 150 К/ч, оставлялась при этой температуре 2 ч, после чего снижалась до комнатной со скоростью ~ 100 К/ч. Для снижения вероятности образования пор кристаллизация сплавов осуществлялась с применением вибрации с частотой 50 Hz. Затем сплавы отжигались при $T = 470 \pm 5$ К в течение двух недель до наступления равновесного состояния, устанавливаемого рентгенофазовым анализом. Чистота элементов, использованных в экспериментах, составляла не менее 99.999% основного вещества.

Сплавы были исследованы методами дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА) и микроструктурного (МСА) анализов.

ДТА был проведен на низкочастотном термографическом регистраторе НТР-75 в интервале температур 293–1080 К, снимались кривые нагрева и охлаждения. Погрешность измерения температуры не превышала ± 1 К. Для регистрации тепловых эффектов с малыми значениями величин был использован прибор „Perkin Elmer STA 6000“, имеющий калориметрическую точность $\pm 2\%$. Эксперименты проводились в интервале температур 293–600 К в атмосфере аргона.

Рентгенофазовый анализ сплавов системы проведен на тщательно растертых порошках после вакуумного гомогенизирующего отжига. Дифрактограммы исследуемых сплавов исследовались на установке „XRD D8 ADVANCE“ с использованием CuK_α излучения в интервале углов $4^\circ < \theta < 35^\circ$ при постоянном режиме съемки (ток 40 mA, напряжение на трубке 40 kV). Температурные зависимости значений параметров элементарной ячейки твердых растворов исследовались в

температурном интервале 300–900 К с использованием высокотемпературной камеры установки „XRD D8 ADVANCE“. Погрешность при определении параметров составляла ± 0.001 Å.

МСА осуществлялся с помощью металлографического микроскопа ММР-4 при увеличениях 150–300 \times . В качестве травителя использовался разбавленный водный раствор $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$, время травления составляло 1–2 min.

Удельный вес исследуемых образцов измеряли пикнометрическим методом [25]. Для этого использовались пикнометры с объемами 5 см³. В качестве наполнителя использовался толуол марки „чда“.

Электропроводность образцов монокристаллов исследовалась на частоте 100 kHz в интервале температур 300–600 К. Исследования проводились цифровым измерителем иммитанса марки Е7-25М в двух кристаллографических направлениях (001, 110). В качестве электрических контактов использовалась серебряная паста. Напряженность приложенного к кристаллам электрического поля соответствовала омической области вольт-амперной характеристики и не превышала 1 V.

3. Результаты и их обсуждение

Фрагменты фазовых диаграмм систем $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ со стороны тройных соединений, построенные на основе результатов ДТА, РФА и МСА приведены на рис. 1, а, б. Как видно из рис. 1, на основе тройных соединений $TlGaTe_2$ и $TlInTe_2$ существует растворимость 5.0 ат.% Te.

Согласно результатам МСА, сплавы системы $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ с концентрацией 1.0–5.0 ат.% Te являются однофазными и представляют собой α -твердые растворы $TlGaTe_{2+x}$ и $TlInTe_{2+x}$. Несмотря на применение вибрации при кристаллизации сплавов, они были пористыми. Следы второй фазы были обнаружены в сплавах с концентрацией Te выше 6.0 ат.%.

Для определения линии сольвуса в системах сплавы с концентрациями 5.0–9.0 ат.% Te были отожжены при температурах 373 К и 450 К в течение двух недель, затем были закалены. Линии сольвуса в диаграммах были построены по результатам МСА закаленных сплавов.

На кривых нагрева в термограммах сплавов с концентрацией 3.0–10.0 ат.% Te был обнаружен происходящий в твердой фазе эндотермический эффект при температуре 498 ± 1 К. Причем, для сплавов систем $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ с концентрацией 3.0–10.0 ат.% Te этот эффект имел практически одинаковую температуру. Рассчитанный тепловой эффект фазового превращения для сплава системы $TlGaTe_2-Te$ с концентрацией теллура 4.0 ат.% составил $\Delta H = 20.46$ cal/mol (85.6 J/mol). На кривых охлаждения этот эффект наблюдался в виде экзотермического эффекта, смещенного вниз по температурной шкале на 3–5 градусов. Процесс, протекающий в сплавах систем $TlGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ при

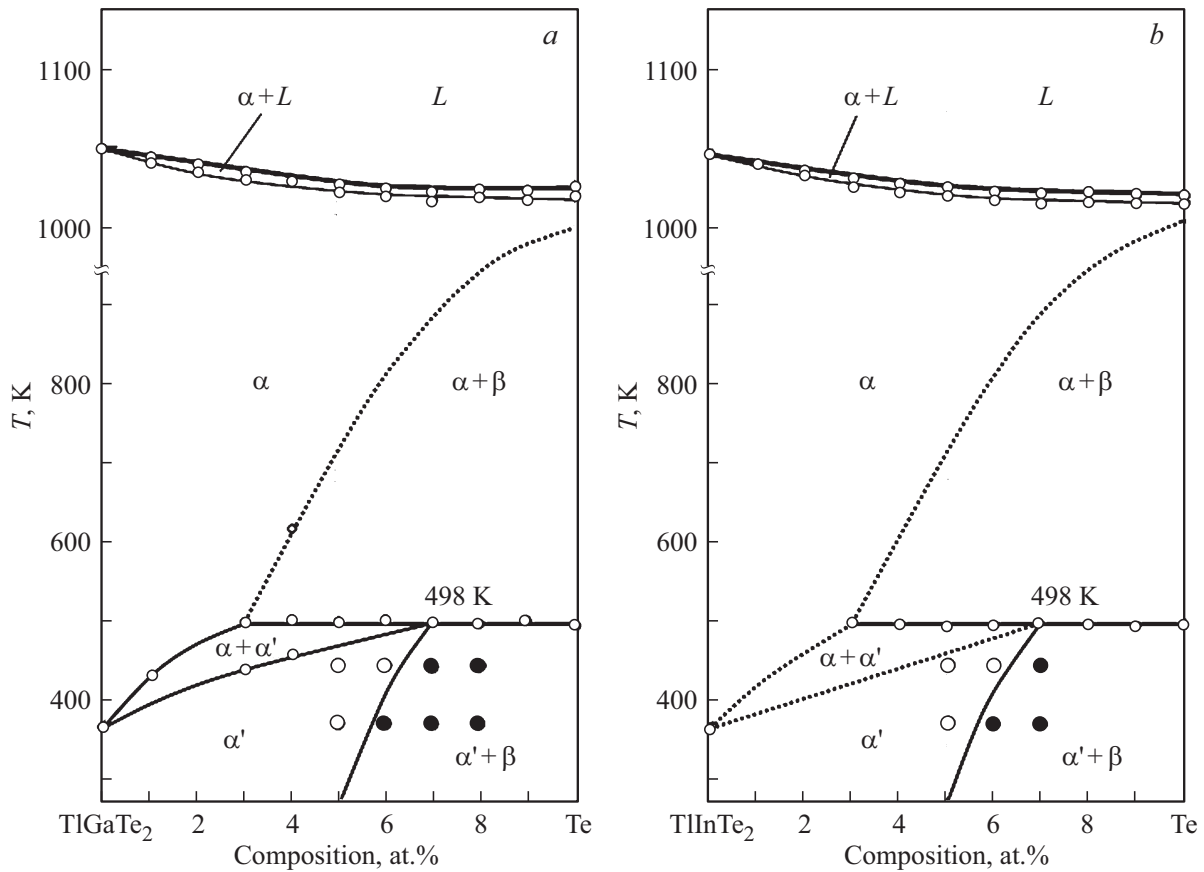
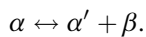


Рис. 1. Фрагменты фазовых диаграмм $TiGaTe_2-Te$ (a) и $TlInTe_2-Te$ (b) в области концентраций 0–10.0 ат.% Te. На участке концентраций 5.0–8.0 ат.% Te однофазные состояния сплавов отмечены белыми кругами, двухфазные — черными.

температуре 498 К может быть интерпретирован как перитектоидное превращение α -твердого раствора



РФА был проведен на сплавах систем $TiGaTe_2-Te$ и $TlInTe_2-Te$ с концентрациями 3.0; 4.0 и 5.0 ат.% Te. Результаты РФА показали, что с повышением концентрации Te в составе α -твердых растворов значения параметров элементарной ячейки меняются незначительно. Для сплава с содержанием 5.0 ат.% Te параметры элементарной ячейки, рассчитанные по рефлексам с индексами 004, 006 и 400, составляют: для $TiGaTe_{2.04}$ $a = 8.476 \text{ \AA}$, $c = 6.985 \text{ \AA}$, а для $TlInTe_{2.04}$ $a = 8.482 \text{ \AA}$, $c = 7.192 \text{ \AA}$.

Измерения пикнометрической плотности образцов показали увеличение значения удельного веса примерно на 1.4% для сплава $TiGaTe_{2.05}$ и 1.3% для сплава $TlInTe_{2.05}$.

Для исследования природы фазового превращения (ФП), происходящего в сплавах $TiGaTe_{2+x}$ при температуре 498 К, сплав с концентрацией 4.0 ат.% Te ($TiGaTe_{2.04}$) методом направленной кристаллизации был выращен в виде монокристалла. Порошковые дифрактограммы были исследованы на дифрактометре D8

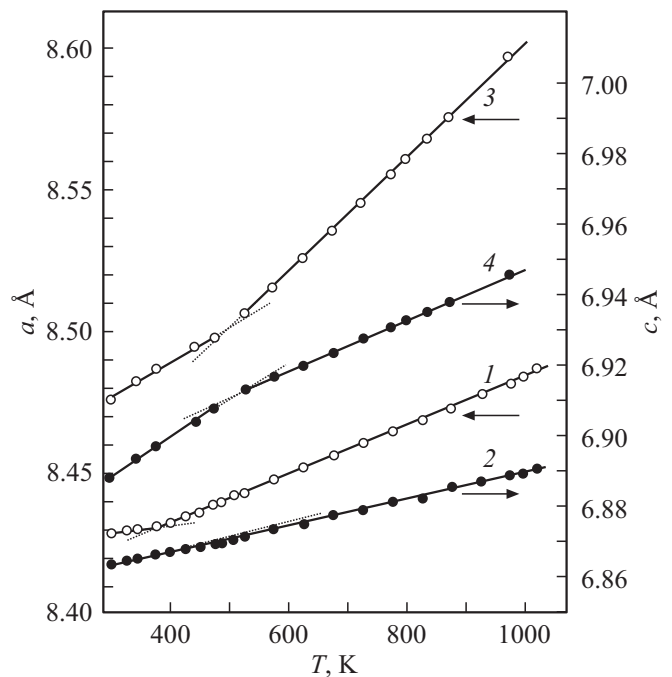


Рис. 2. Температурные зависимости параметров кристаллической ячейки a и c $TiGaTe_2$ (кривые 1, 2) и $TiGaTe_{2.04}$ (кривые 3, 4) в интервале 300–1000 К: a — 1, 3; c — 2, 4.

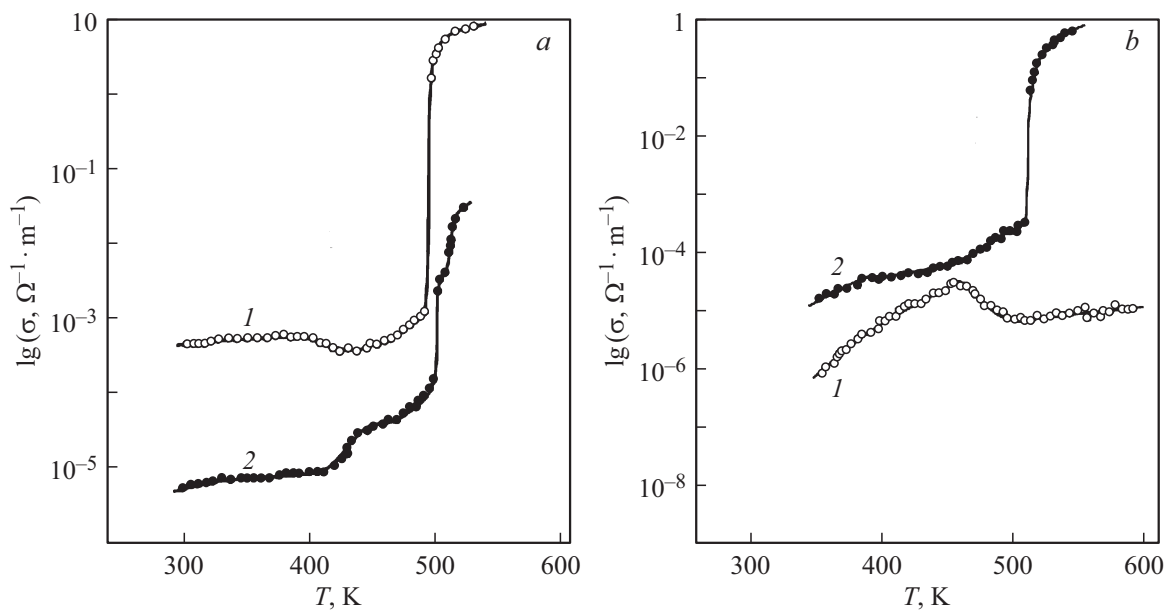


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности кристаллов $TlGaTe_2$ (a) и $TlGaTe_{2.04}$ (b), снятые в направлениях параллельном (кривые 1) и перпендикулярном (кривые 2) оси c при частоте измерения 100 kHz.

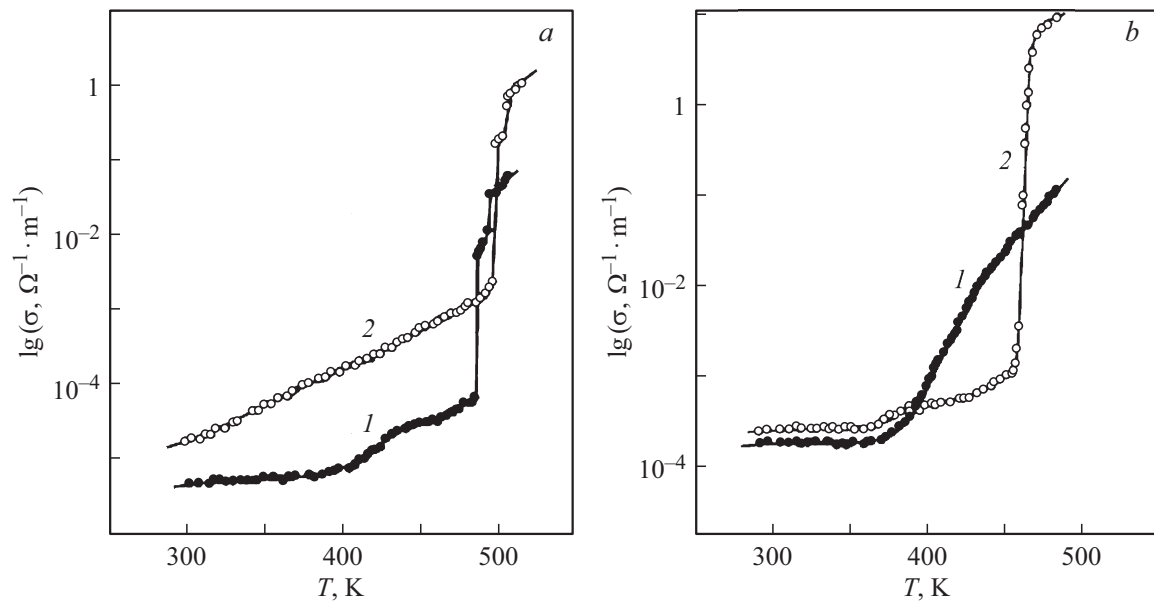


Рис. 4. Температурные зависимости электропроводности кристаллов $TlInTe_2$ (a) и $TlInTe_{2.04}$ (b), снятые в направлениях параллельном (кривые 1) и перпендикулярном (кривые 2) оси c при частоте измерения 100 kHz.

ADVANCE в температурном интервале 300–1000 К. Анализ полученных результатов показал, что в интервале температур 300–1000 К на дифрактограммах образца $TlGaTe_{2.04}$ образование новых рефлексов не наблюдается. На дифрактограммах наблюдались смещения рефлексов в результате теплового расширения кристаллической решетки.

На рис. 2 приведены температурные зависимости параметров a и c элементарной ячейки кристаллов $TlGaTe_2$ и $TlGaTe_{2.04}$, определенные из порошковых дифрактограмм. Как видно из рис. 2 (1, 2), температурные

зависимости параметров a и c $TlGaTe_2$ представляют собой линейные зависимости с двумя прямолинейными участками в зависимости $a(T)$ — 300–375 К и 375–1000 К, а в зависимости $c(T)$ — 300–385 К и 385–1000 К.

Для $TlGaTe_{2.04}$ наблюдаются аналогичные зависимости с более резким, по сравнению с $TlGaTe_2$, изменением значений параметров a и c (рис. 2, (3, 4)). Подобное поведение параметров a и c свидетельствует о наличии ФП в $TlGaTe_2$ и $TlGaTe_{2.04}$ в интервалах температур 370–385 К и 498–505 К соответственно. Необходимо

отметить, что согласно кривой зависимости 3 и 4, температура ФП в кристалле состава $\text{TlGaTe}_{2.04}$ имеет более высокое значение, чем в исходном кристалле.

Сравнение кривых 3 и 4 показало, что после ФП термическое расширение кристалла заметно ускоряется по оси a .

Электрофизические исследования, проведенные в кристаллах TlGaTe_2 ранее, выявили наличие в них ионной, а выше 300 К — суперионной проводимости. Согласно данным [18–20], переход в суперионное состояние сопровождается аномалией в виде скачка проводимости в зависимости $\sigma(T)$. Наблюдаемая выше температуры 300 К в кристаллах TlGaTe_2 аномально высокая проводимость, по мнению [20], обусловлена разупорядочением катионной подрешетки таллия и, как результат, скачком ионной проводимости. Согласно [26–28], разупорядочение, происходящее в одной из подрешеток кристалла при „критической температуре“, является характерным для суперионных проводников.

Ионы Tl^+ в кристаллах TlGaTe_2 и TlInTe_2 расположены внутри томсоновских кубов, связи $\text{Tl}^+ - \text{Te}$ носят ионно-ковалентный характер и имеют низкие значения энергии связи [15,29]. Ионы таллия в структуре TlGaTe_2 и TlInTe_2 расположены таким образом, что между ними в структуре имеются октаэдрические пустоты.

Возможно, что в подрешетке таллия кристаллов TlGaTe_2 и TlInTe_2 и из-за низкоэнергетических значений связей $\text{Tl}^+ - \text{Te}$ при достижении „критической температуры“ происходит „плавление“ подрешетки таллия [26–28], при этом другая подрешетка, образованная ионами индия и теллура, сохраняет „жесткость“ и тем самым обеспечивает механическую прочность кристалла как целого.

Вероятнее всего, наблюдаемое в системах $\text{TlGaTe}_2 - \text{Te}$ и $\text{TlInTe}_2 - \text{Te}$ перитектоидное превращение α -твердого раствора, происходящее при одной и той же температуре ($T = 498$ К), связано именно с „плавлением“ (разупорядочением) подрешетки таллия и переходом кристалла в ионно-проводящее (суперионное) состояние. Согласно рис. 2 в TlGaTe_2 процесс разупорядочения происходит в интервале температур 370–385 К, а в $\text{TlGaTe}_{2.04}$ — в интервале 498–505 К.

На монокристаллах составов $\text{TlGaTe}_{2.04}$ и $\text{TlInTe}_{2.4}$ в кристаллографических направлениях (110 и 001) были исследованы температурные зависимости электропроводности $\sigma(T)$ в температурном интервале 300–600 К. Результаты этих исследований приведены на рис. 3, a, b .

Как видно из рис. 3, a , на температурных зависимостях электропроводности $\sigma(T)$ кристаллов TlGaTe_2 в кристаллографических направлениях (001) и (110) имеются скачки проводимости в суперионную фазу, причем в кристаллографическом направлении (001) процесс перехода происходит при более низкой температуре, чем в направлении (110). В направлении (001) величина изменения проводимости составляет более чем три порядка.

На зависимостях $\sigma(T)$ кристалла $\text{TlGaTe}_{2.04}$ переход на суперионную фазу наблюдается только в направлении (110) (рис. 3, b). При этом проводимость

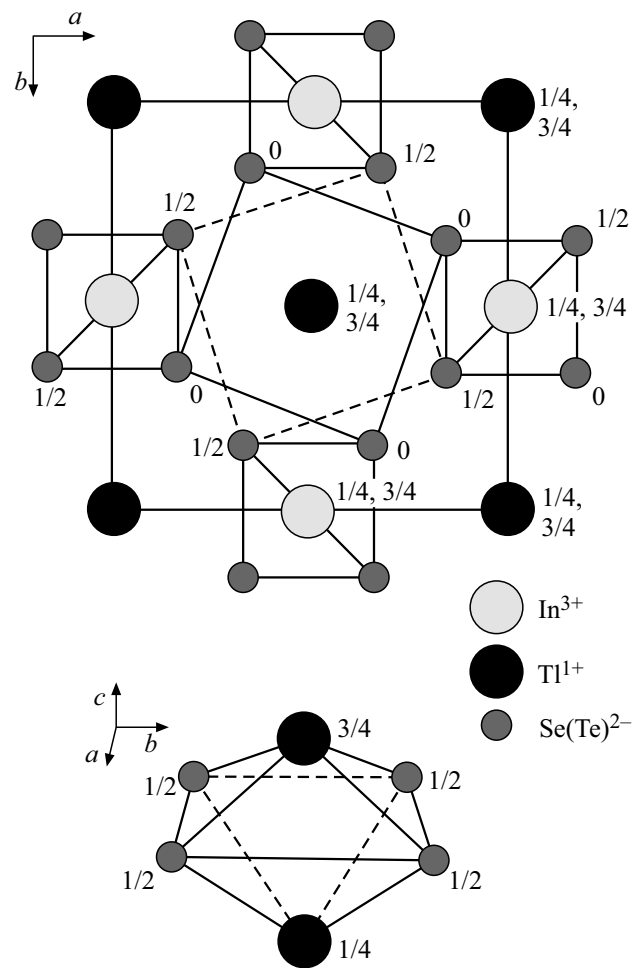


Рис. 5. Проекция элементарной ячейки кристалла TlInSe_2 (Te_2) на плоскость 001. Внизу показан пустой октаэдрический полиэдр между ионами таллия.

кристалла в кристаллографическом направлении (001) скачком уменьшается на $\sim 10^3$. Сравнение кривых $\sigma(T)$ в направлении (110) кристаллов TlGaTe_2 и $\text{TlGaTe}_{2.04}$ свидетельствует, что в кристалле $\text{TlGaTe}_{2.04}$ температура ФП в суперионную фазу выше на 5 К. Отметим, что аналогичная картина наблюдается и на зависимостях $\sigma(T)$ кристаллов TlInTe_2 и $\text{TlInTe}_{2.4}$ (рис. 4, a, b).

Учитывая результаты анализа температурной зависимости проводимости $\sigma(T)$ кристаллов TlGaTe_2 и $\text{TlGaTe}_{2.04}$, а также TlInTe_2 и $\text{TlInTe}_{2.04}$, можно полагать, что сверхстехиометрические количества атомов теллура, образуя твердые растворы состава TlGaTe_{2+x} и TlInTe_{2+x} , занимают октаэдрические пустоты (рис. 5) между соседними атомами Tl^+ в элементарной ячейке ($z = 0.5$) и, таким образом, препятствуют их перемещению в кристаллографическом направлении (001) под действием электрического поля. При этом температура фазового перехода в твердых растворах TlGaTe_{2+x} и TlInTe_{2+x} в кристаллографическом направлении (110) повышается на ~ 5 К.

Отметим, что избирательное действие примесей на проводимость кристаллов в разных кристаллографических направлениях наблюдалось и в работах [30–31].

4. Заключение

Таким образом, комплексными методами физико-химического анализа исследованы сплавы системы $TlGaTe_2$ –Te и $TlInTe_2$ –Te, и обнаружена область растворимости теллура, доходящая до 5.0 ат.%. На монокристаллических образцах изучены температурные зависимости параметров решетки и электропроводности $\sigma(T)$ $TlGaTe_2$, $TlGaTe_{2.04}$ и $TlInTe_2$ и $TlInTe_{2.04}$. Показано, что кристаллы $TlGaTe_{2.04}$ и $TlInTe_{2.04}$ претерпевают фазовый переход в суперионную фазу при температуре 498 К. Предположено, что сверхстехиометрические количества атомов теллура в кристаллах $TlGaTe_{2+x}$ и $TlInTe_{2.04}$, внедряясь в решетку, создают дополнительные препятствия на пути движения ионов Tl^+ в кристаллографическом направлении (001), повышая по сравнению с исходными кристаллами температуру перехода в суперионное состояние в направлении (110) на ~ 5 К.

Список литературы

- [1] N.I. Sorokin, D.N. Karimov, E.A. Sulyanova, Z.I. Zhmurova, B.P. Sobolev. *Crystallography Rep.* **55**, 4, 662 (2010).
- [2] I.E. Hooton, P.W.M. Jacobs. *Can. J. Chem.* **66**, 4, 830 (1988).
- [3] P.J. Walker. *J. Crystal Growth*, **44**, 2, 187 (1978).
- [4] C. Tien, E.V. Charnaya, A.B. Sherman. *Phys. Solid State*, **46**, 9, 1578 (2004).
- [5] W.L. Roth, R.E. Benenson, C.J. Wielunski, B. Dunn. *Solid State Ionics*, **9-10**, 2, 1459 (1983).
- [6] М.П. Трубицын, М.Д. Волнянский, А.Х. Обайдат. *ФТТ* **50**, 7, 1184 (2008).
- [7] Физика суперионных проводников / Под. ред. М.Б. Соломонова. Рига (1982). 316 с.
- [8] Б.Н. Бондарев, В.М. Жуков, В.М. Белоус. *ФТТ* **32**, 4, 1161 (1990).
- [9] Н.Ф. Уваров. *Успехи химии* **76**, 5, 454 (2007).
- [10] E.V. Murashova, N.N. Chudinova, A.B. Ilyukhin, V.A. Tarnopol'skii, A.B. Yaroslavtsev. *Inorganic Mater.* **39**, 12, 1303 (2003).
- [11] В. Алыев, Ш.Г. Гасымов, Т.Г. Мамедов, Т.С. Мамедов, А.И. Наджафов, М.Ю. Сеидов. *ФТТ* **48**, 12, 2194 (2006).
- [12] R.L. Ammlung, R.P. Scaringe, J.A. Ibers, D.F. Shriver, D.H. Whitmore. *J. Solid State Chem.* **29**, 3, 401 (1979).
- [13] W. Granier, P. Bernier, M. Dohri, J. Alizon, H. Robert. *J. Phys. Lett.* **42**, 13, 301 (1981).
- [14] D. Muller, G. Eulenberger, H. Hahn. *Z. Anorg. Allg. Chem.* **398**, 207 (1973).
- [15] Н.Х. Абрикосов, В.Ф. Банкаина, Л.В. Порецкая, Е.В. Скуднова, С.Н. Чижевская. *Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе*. Наука, М. (1975). 219 с.
- [16] М.Б. Бабанлы, А.А. Кулиев. *Азерб. хим. журн.* **4**, 110 (1977).
- [17] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.И. Наджафов, А.П. Абдуллаев, Э.А. Зейналов, Д.Г. Джаббаров. *Изв. НАН Азербайджана. Сер. физ.-мат. и техн. наук* **5**, 45 (2005).
- [18] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Э.К. Гусейнов, Ф.Т. Салманов, Н.А. Алиева, Р.Ш. Агаева. *ФТП* **47**, 5, 696 (2013).
- [19] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Ф.Т. Салманов. *ФТТ* **53**, 8, 1488 (2011).
- [20] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Э.К. Гусейнов, Э.М. Годжаев, Ф.Т. Салманов. *ФТП* **45**, 8, 1009 (2011).
- [21] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Ф.Т. Салманов, О.З. Алекперов, Э.К. Гусейнов, Н.А. Алиева. *ФТП* **45**, 11, 1441 (2011).
- [22] А.И. Наджафов, О.З. Алекперов, Г.Г. Гусейнов, А.П. Абдуллаев. *Неорган. материалы* **48**, 12, 1309 (2012).
- [23] А.И. Наджафов, Г.Г. Гусейнов, О.З. Алекперов, Р.М. Сардарлы, А.П. Абдуллаев, Н.А. Эюбова. *Кристаллография* **53**, 5, 864 (2008).
- [24] О.З. Алекперов, А.И. Наджафов, Г.Г. Гусейнов, А.П. Абдуллаев. *Изв. НАН Азербайджана. Сер. физ.-мат. и техн. наук* **30**, 5, 189 (2010).
- [25] С.А. Медведев. *Введение в технологию полупроводниковых материалов*. Высш. шк., М. (1970). 503 с.
- [26] А.К. Иванов-Щиц, И.В. Мурун. *Ионика твердого тела*. Изд-во Санкт-петербургского ун-та, СПб (2000). Т. 1. 617 с.
- [27] *The Physics of Superionic Conductors and Electrode Materials* / Ed. J.W. Perram. Springer Science, Business Media (2013). 281 p.
- [28] А. Лидьярд. *Ионная проводимость кристаллов*. Изд-во ИЛ, М. (1962). 222 с.
- [29] З.С. Медведева. *Халькогениды элементов IIIБ подгруппы периодической системы*. Наука, М. (1968). 216 с.
- [30] М.П. Трубицын, М.Д. Волнянский, А.Х. Яхья Обайдат. *ФТТ* **50**, 7, 1184 (2008).
- [31] В.И. Барбашов, В.М. Тимченко, Е.В. Несова. *Физика и техника высоких давлений* **20**, 2, 74 (2010).

Редактор Т.Н. Василевская