

08,03

Точечные дефекты висмута в кристаллах TlInTe_2 , электрофизические и диэлектрические свойства твердых растворов

© А.И. Наджафов¹, Р.С. Мадатов², К.Г. Халилова^{1,¶}, Г.М. Искендерова¹¹ Институт физики НАН Азербайджана AZ 1143, Баку, Азербайджан² Институт радиационных проблем НАН Азербайджана AZ 1143, Баку, Азербайджан

¶ E-mail: xelilova_kemale79@mail.ru

Поступила в Редакцию 1 марта 2022 г.

В окончательной редакции 1 марта 2022 г.

Принята к публикации 10 марта 2022 г.

Комплексными методами физико-химического анализа была исследована фазовая диаграмма $\text{TlInTe}_2\text{–Bi}$ в концентрационной области 0–10 at.% Bi, установлена растворимость висмута в TlInTe_2 в количестве 5.0 at.% при комнатной температуре. Проведены исследования электрофизических и диэлектрических свойств твердых растворов $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$.

На примере состава $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$ показано, что примеси висмута повышают значение проводимости в направлении (001), приводят к изменению типа проводимости кристалла TlInTe_2 с дырочной на электронную, сильно повышают значение электрической анизотропии кристалла TlInTe_2 $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ более, чем в 10^3 раз.

Наблюдается также влияние примесей висмута на диэлектрические свойства кристаллов TlInTe_2 . Примеси висмута образуют барьеры на пути движения ионов таллия и повышают температуру фазового перехода в ионно-проводящую фазу (Ti): в кристаллографическом направлении [001] — на 69 К, а в направлении [110] — на 87 К.

Ключевые слова: фазовая диаграмма, физико-химический анализ, примесь, тип проводимости, электропроводность, диэлектрическая проницаемость.

DOI: 10.21883/FTT.2022.07.52566.302

1. Введение

Полупроводниковое соединение TlInTe_2 принадлежит к классу соединений группы $A^3B^3C_2^6$ (где A — Tl; B — Ga, In; C — S, Se, Te) с цепочечной структурой, кристаллизуются в тетрагональной сингонии в структурном типе TlSe [1] и имеет кристаллографические параметры: $a = 8.075 \text{ \AA}$, $c = 7.181 \text{ \AA}$, $d_r = 7.196 \text{ g/cm}^3$, $Z = 4$.

Проводимые в последние годы исследования показали перспективность применения этих соединений в различных областях техники. В частности, на их основе созданы высокочувствительные тензометрические датчики гидростатического давления [2], пироэлектрические приемники излучения, функционирующие в широком интервале температур [3] и т.д. Наблюдаемый в литературе [4–5] повышенный интерес к исследованию твердых растворов на основе $A^3B^3C_2^6$ связан с перспективами применения этих материалов.

Интерес к исследованиям этих кристаллов обусловлен также в связи с обнаружением в них ионной проводимости при температурах, близких к комнатной [6–9]. В работах [6–9] были проведены исследования ионной проводимости в кристаллах TlGaTe_2 и TlInTe_2 в широком интервале температур 80–700 К. Было показано, что в кристаллах TlGaTe_2 и TlInTe_2 при температурах ниже 300 К преобладает электронная составляющая проводи-

мости, с дальнейшим ростом температуры (выше 300 К) наблюдается скачкообразный рост проводимости, связанной с ростом ионной составляющей и обусловленной разупорядочением катионной подрешетки Tl^+ .

Структуру кристаллов TlInTe_2 можно представить как две подсистемы: отрицательно заряженную индиевую подсистему $(\text{In}^{3+}\text{Te}_2^{2-})$, расположенную параллельно кристаллографической оси c и образующую цепочки, и расположенную между цепочками неустойчивую таллиевую подсистему. Причиной неустойчивости таллиевой подрешетки является слабая связь Tl–Te, которая по данным [10] примерно в два раза слабее, чем связь In–Te. 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. Ионы таллия в структуре TlGaTe_2 и TlInTe_2 расположены таким образом, что между ними в структуре имеются октаэдрические пустоты. В работе [11] 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 at.%. На монокристаллических образцах изучены температурные зависимости параметров решетки и электропроводности $\sigma(T)$ TlInTe_2 и $\text{TlInTe}_{2.04}$. Показано, что кристаллы $\text{TlInTe}_{2.04}$ осуществляют фазовый переход в

суперионную фазу при температуре 498 К. Предполагается, что сверхстехиометрические количества атомов теллура в кристаллах $TlInTe_{2.04}$, внедряясь в решетку, образуют твердые растворы внедрения и создают дополнительные препятствия на пути движения ионов Tl^+ в кристаллографическом направлении $[001]$, повышая по сравнению с исходными кристаллами температуру перехода в суперионное состояние.

Наши исследования показали, что созданием заранее запланированных точечных дефектов в структуре $TlInTe_2$ можно изменить ряд физических свойств, таких как тип проводимости, значения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости и т. д.

Размещением определенных атомов в октаэдрических пустотах между атомами таллия в элементарной ячейке $TlInTe_2$ в виде твердых растворов внедрения можно управлять также температурой фазового перехода кристалла в ионно-проводящую фазу (T_i), смещая T_i в том или ином направлении.

Выбор вида атомов внедрения в структуру необходимо осуществлять исходя из их химической активности, значения ионного радиуса, координационного числа. Химическая активность выбранного атома не должна превышать химическую активность материнских атомов, в противном случае, может происходить восстановление собственных атомов. При этом, значение ионного радиуса и координационного числа внедряемого иона должны позволять, не деформируя решетку, размещаться ему в выбранном полиэдре.

В электрохимическом ряду активности металлов Bi находится за водородом и уступает таллию и индию, в трехвалентном состоянии его ионный радиус имеет значение 1.2 \AA . Ионы висмута могут занимать позиции с координационным числом 5, 6 и 8 [12]. Таким образом, по предварительной оценке, атомы висмута могут размещаться в пустых октаэдрах между атомами таллия.

В настоящей работе для определения растворимости висмута в кристаллах $TlInTe_2$ методами физико-химического анализа была исследована фазовая диаграмма $TlInTe_2-Bi$ в концентрационной области 0–10 at.% Bi и проведены исследования электрофизических и диэлектрических свойств твердых растворов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$.

2. Методика экспериментов

Сплавы системы $TlInTe_2-Bi$ были синтезированы в интервале концентрации 1.0 at.% в вакуумированных кварцевых сосудах Степанова с использованием метода прямого одностепенного синтеза. В качестве исходных компонентов использовались поликристаллический $TlInTe_2$ и висмут. Температуру в печи поднимали до $T = 1150 \text{ K}$ со скоростью $\sim 150 \text{ K/h}$, выдерживали при этой температуре в течение 2 h, после чего охлаждали печь до комнатной температуры со скоростью $\sim 100 \text{ K/h}$. Для снижения вероятности образования пор

кристаллизация сплавов осуществлялась с применением вибрации частотой 50 Hz. Затем для гомогенизации сплавы отжигали при $T = 470 \pm 5 \text{ K}$ в течение двух недель до наступления равновесного состояния, устанавливаемого рентгенофазовым анализом. Чистота элементов, использованных в экспериментах, составляла 99.999% основного вещества.

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

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 $\pm 1 \text{ K}$. 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 был проведен на тщательно растертых порошках сплавов после вакуумного гомогенизирующего отжига. Дифрактограммы исследуемых сплавов исследовались на установке „XRD D8 ADVANCE“ с использованием CuK_α излучения в интервале углов $4 < \theta < 35^\circ$ при постоянном режиме съемки (ток 40 mA, напряжение на трубке 40 kV). Погрешность при определении параметров составляла $\pm 0.001 \text{ \AA}$.

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.

Измерения микротвердости проводились на приборе ПМТ-3 [13] на шлифованных и полированных образцах при нагрузке 20 g. Время погружения нагрузки составляло 10–12 s.

Удельный вес исследуемых образцов измерялся пикнометрическим методом [14]. Для этого использовались пикнометры с объемами 5 cm^3 . В качестве наполнителя использовался толуол марки „чда“. ВАХ образцов измерялась по стандартной методике, описанной в [15]. Значение удельного сопротивления вычислялись из зависимостей ВАХ при комнатной температуре. Образцы кристаллов $TlInTe_2$ и $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$ обладали светочувствительностью в фоторезистивном режиме, поэтому зависимости ВАХ снимались в темноте.

Температурную зависимость электропроводности и диэлектрической проницаемости образцов монокристаллов исследовали на частоте 100 kHz в интервале температур 300–600 К. Исследования проводились цифровым измерителем иммитанса марки E7-25M в двух кристаллографических направлениях $[001]$ и $[110]$. В качестве электрических контактов использовалась серебряная паста. Напряженность приложенного к кристаллам элек-

трического поля соответствовала омической области вольт-амперной характеристики и не превышала 1 В.

3. Результаты и их обсуждение

Построенный на основе результатов ДТА, РФА и МСА фрагмент фазовой диаграммы системы $\text{TlInTe}_2\text{-Bi}$ со стороны тройного соединения TlInTe_2 , приведен на рис. 1. Как видно из рис. 1, на основе тройного соединения TlInTe_2 существует область растворимости висмута в количестве 5.0 at.%. Согласно результатам МСА сплавы системы $\text{TlInTe}_2\text{-Bi}$ с концентрацией 1.0–5.0 at.% Bi являются однофазными, имеют полосчатую микроструктуру и представляют собой α -твердые растворы $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$. Несмотря на применение вибрации при кристаллизации сплавов, они были пористыми. Следы второй фазы были обнаружены в сплавах с концентрацией Bi выше 6.0 at.%.

Для определения линии сольвуса в системе сплавы с концентрациями 5.0–9.0 at.% Te были отожжены при температурах 375 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 at.% Bi был обнаружен наблюдаемый в

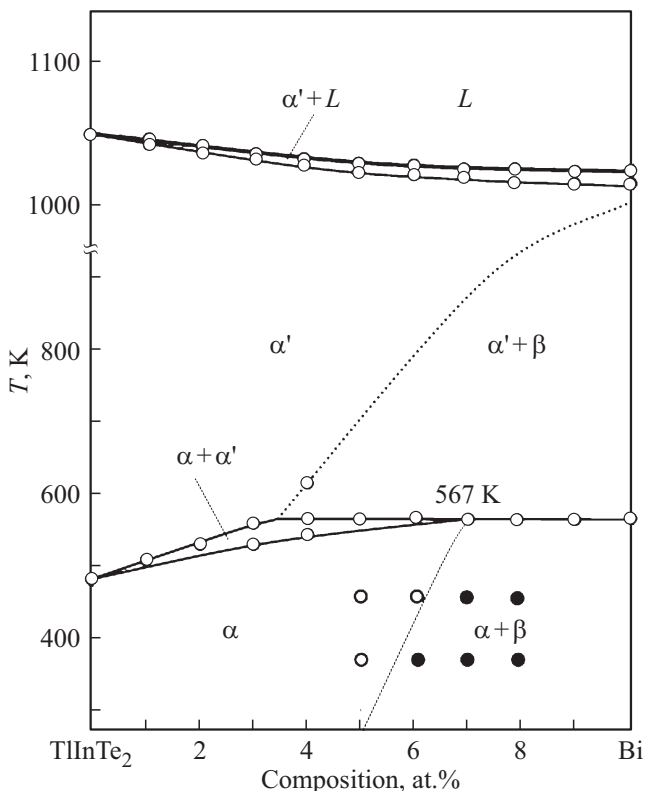


Рис. 1. Фрагмент фазовой диаграммы $\text{TlInTe}_2\text{-Bi}$ в области концентраций 0–10.0 at.% Bi. На участке концентраций 5.0–8.0 at.% Bi однофазные состояния сплавов отмечены белыми кружками, двухфазные — черными.

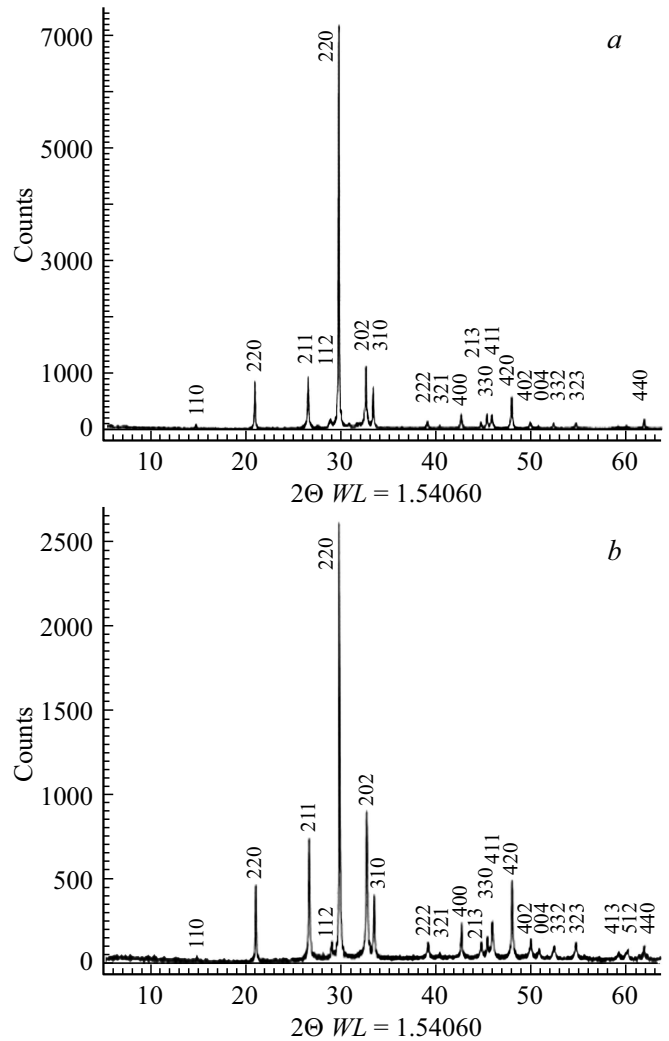


Рис. 2. Дифрактограммы порошков кристаллов: *a* — TlInTe_2 , *b* — $(\text{TlInTe}_2)_{0.95}\text{Bi}_{0.05}$.

твердой фазе эндотермический эффект при температуре 576 ± 1 К. Причем, для сплавов системы $\text{TlInTe}_2\text{-Bi}$ с концентрацией 3.0–10.0 at.% Bi этот эффект имел практически одинаковую температуру. На кривых охлаждения этот эффект наблюдался в виде экзотермического эффекта, смещенного вниз по температурной шкале на 3–5 градусов.

Процесс, протекающий в сплавах системы $\text{TlInTe}_2\text{-Bi}$ при температуре 567 К, может быть интерпретирован как перитектоидное превращение α -твердого раствора: $\alpha \leftrightarrow \alpha' + \beta$.

РФА сплавов системы проведен на растертых порошках с концентрациями 3.0, 4.0 и 5.0 at.% Bi после вакуумного гомогенизирующего отжига при температуре 770 ± 5 К в течение двух недель.

Результаты РФА показали, что с повышением концентрации Bi в составе α -твердых растворов значения параметров элементарной ячейки меняются незначительно (рис. 2). Для сплава твердого раствора с содержанием

Значения удельного сопротивления, типа проводимости, энергий активации и величин электрической анизотропии образцов кристаллов $TlInTe_2$ и $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$

| Состав образца | Кристаллографическое направление измерений | Значение удельного сопротивления ρ , $\Omega \cdot cm$ | Энергия активации E_a , eV | Величина электрической анизотропии $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ | Тип проводимости |
|---|--|---|------------------------------|--|------------------|
| $TlInTe_2$ | [001] (\parallel) | 795 | 0.6 | 97.3 | p |
| $TlInTe_2$ | [110] (\perp) | $77.35 \cdot 10^3$ | 0.4 | | |
| $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$ | [001] (\parallel) | 0.83 | — | $7.668 \cdot 10^5$ | n |
| $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$ | [110] (\perp) | $636.4 \cdot 10^3$ | 0.5 | | |

5.0 at.% Bi параметры элементарной ячейки, рассчитанные по рефлексам с индексами 004, 006 и 400, 600 составляют: $a = 8.481 \text{ \AA}$, $c = 7.192 \text{ \AA}$. Как видно, значение параметра элементарной ячейки a уменьшилась на 0.013 \AA , а параметр c наоборот увеличился на 0.011 \AA .

Измерения пикнометрической плотности образцов показали незначительное увеличение значения удельного веса (0.1%) для сплава $(TlInTe_2)_{0.95}Bi_{0.05}$.

Значения микротвердости сплавов определены на сплавах с концентрациями висмута 0, 1.0, 3.0 и 5.0 at.% Bi. Наблюдается повышение значения микротвердости на сплавах с 100 kgf/mm^2 для $TlInTe_2$ до 114 kgf/mm^2 для $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$.

Для исследования влияния висмута на электрофизические и диэлектрические свойства твердых растворов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$ сплав с концентрацией 5.0 at.% Bi был выращен в виде монокристалла методом направленной кристаллизации и отожжен при температуре 670 K в течение 2-х недель.

Затем полученный монокристалл был сколот по оси c на призмы высотой 5–7 mm для измерений электрофизических свойств, и на кристаллографические поверхности (001) и (110) были нанесены контакты серебряной пастой. На образцах кристаллов были определены значение удельного сопротивления (ρ), определен тип проводимости, исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) и температурные зависимости проводимости $\sigma(T)$ в диапазоне 100–370 K, определены значение энергии активации (E_a).

В таблице показаны результаты исследований удельного сопротивления, типа проводимости, значение энергии активации и величина электрической анизотропии образцов кристаллов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$. Для сравнения там же показаны одноименные физические характеристики образцов монокристаллического $TlInTe_2$. Как видно из таблицы, электрофизические свойства и показатели образцов монокристалла $(TlInTe_2)_{0.95}Bi_{0.05}$ сильно отличаются от одноименных показателей монокристалла $TlInTe_2$. В отличие от образцов $TlInTe_2$, кристаллы $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$ обладают n -типом проводимости. Сильное отличие наблюдается также в значениях удельной проводимости сравниваемых кристаллов. Например, в кристаллографическом направлении [001] значение ρ

образцов $(TlInTe_2)_{0.95}Bi_{0.05} \sim$ в 10^3 раза отличается от значения ρ $TlInTe_2$. Таким образом легирование висмутом сильно понизило значение ρ в направлении цепочек. А в направлении [110], наоборот, значение удельного сопротивления образцов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$ повысилось \sim в 8 раз. В результате легирования сильно изменилась анизотропия электропроводности кристаллов, как правило, для монокристаллов $TlInTe_2$ она не превышает значения 10^2 , тогда как для $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$, она составляет $\sim 7.7 \cdot 10^5$. Для исследования перераспределения висмута по длине выращенного монокристалла значения удельного сопротивления были измерены в трех образцах, выбранных по длине слитка. Результаты показали, что по длине слитка имеются флуктуации значений удельного сопротивления, не превышающие $\sim 5\%$. Поэтому в таблице показаны усредненные значения удельного сопротивления кристаллов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$, определенные в направлении ρ_{\parallel} .

На рис. 3, *a, b* представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов $TlInTe_2$ и $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$ в двух геометриях эксперимента, снятые при температуре 300 K.

На ВАХ $TlInTe_2$ (рис. 3, *a*, кривая 1), снятой в направлении [001], выявляется омический участок ($J \sim U$), а в направлении [110] (рис. 3, *b*, кривая 1) область более резкого роста напряжения ($J \sim U^n$, $n > 1$) при напряженности поля 12.0 V/cm . Линейный участок наблюдается в области полей $1.0\text{--}11.5 \text{ V/cm}$, квадратичная область наблюдается в интервале полей $11.5\text{--}13.0 \text{ V/cm}$. На ВАХ кристаллов $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$ (рис. 3, *a*, кривая 2) в направлении [001] выявляются омический участок ($J \sim U$) до значений напряженности поля $0\text{--}0.68 \text{ V/cm}$, а в направлении [110] (рис. 3, *b*, кривая 3) область более резкого роста напряжения ($J \sim U^n$, $n > 1$) при напряженности поля в интервале $0\text{--}32.5 \text{ V/cm}$. К сожалению, из-за нагрева образца измерить ВАХ при более высоких напряженностях электрического поля не удалось.

На рис. 4, *a* и *b* в кристаллографических направлениях [001] и [110] соответственно, показаны кривые температурной зависимости удельной проводимости $\sigma(T)$ образцов $TlInTe_2$ и $(TlInTe_2)_{1-x}Bi_x$, где $x = 0.05$.

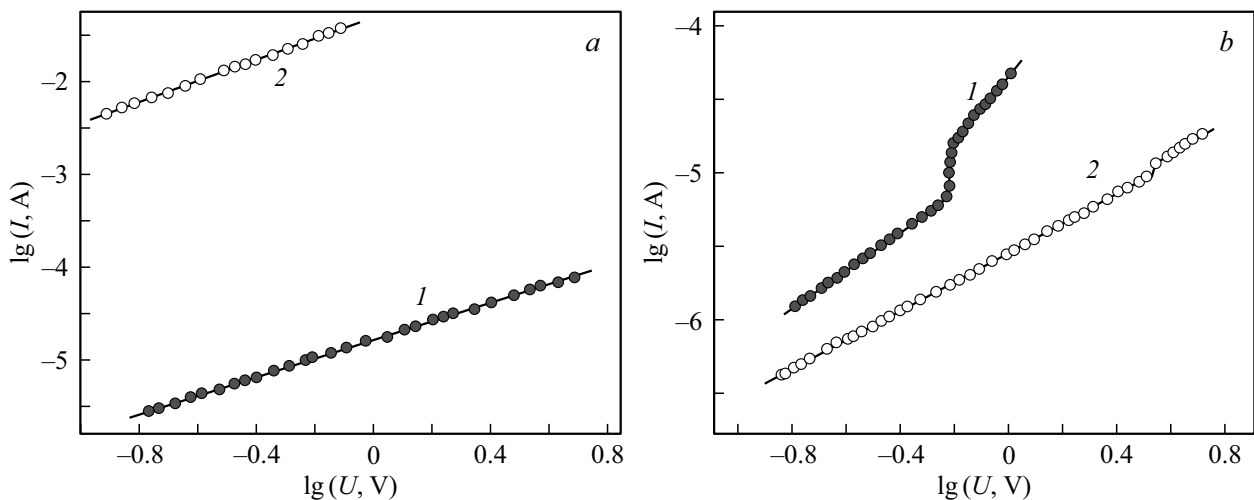


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики образцов кристаллов. *a*: 1 — TlInTe_2 (001), 2 — $(\text{TlInTe}_2)_{0.95}\text{Bi}_{0.05}$ (001); *b*: 1 — TlInTe_2 (110), 2 — $(\text{TlInTe}_2)_{0.95}\text{Bi}_{0.05}$ (110).

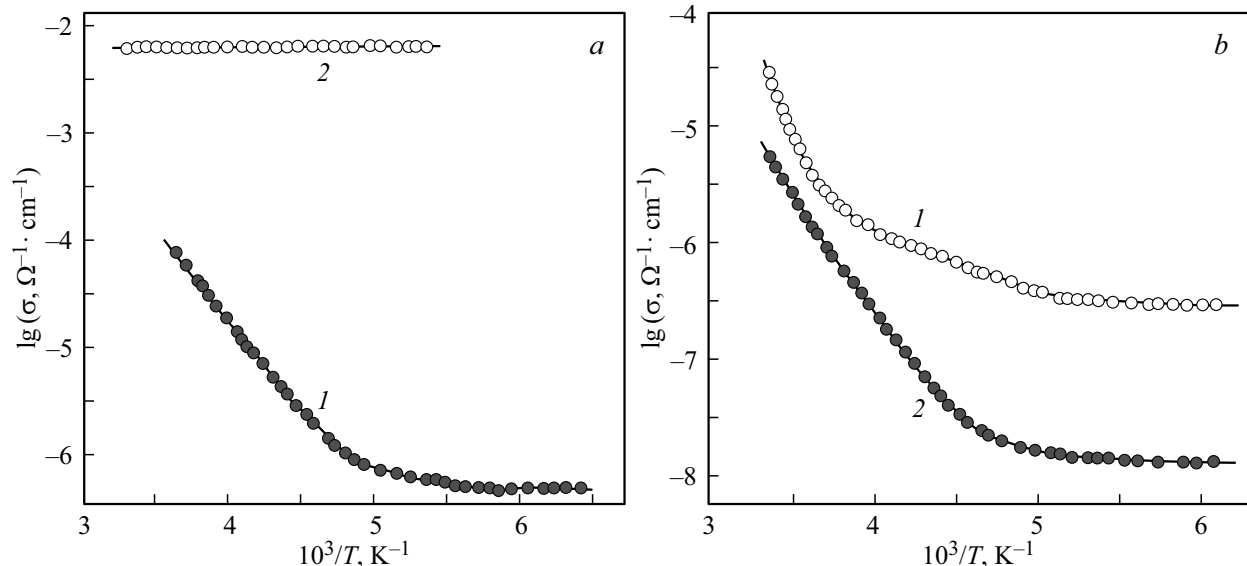


Рис. 4. Кривые температурной зависимости удельной проводимости образцов TlInTe_2 (кривые 1) и $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$: (кривые 2) в разных кристаллографических направлениях: *a* — [001] и *b* — [110].

Из кривых $\sigma(T)$ кристаллов TlInTe_2 определены энергии активации E_a , которые имеют значение в кристаллографическом направлении (001) 0.6 eV, а в направлении (110) — 0.4 eV. На кривой 1 (рис. 4, *b*) в области температур 180–270 К наблюдается область примесной проводимости, возможно обусловленной дефектами структуры.

Для $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$, в кристаллографическом направлении [001] зависимость $\sigma(T)$ в интервале температур 165–307 К имеет линейный характер (рис. 4, *a*, кривая 2) и не зависит от температуры. Возможно это связано со множеством близлежащих по энергии уровнями дефектов, образованных в результате легирования кристалла висмутом.

В этих образцах в направлении [110], по-видимому, в результате легирования значение удельной проводимости кристалла уменьшилось почти на порядок и значение E_a составило 0.5 eV. Снижение значения удельной проводимости кристалла вероятно обусловлено компенсацией акцепторных и образованием донорных уровней, при этом кристалл меняет тип проводимости.

Для определения влияния примесей висмута на диэлектрические свойства кристаллов TlInTe_2 были также исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ в интервале температур 300–650 К в кристаллографическом направлении (001).

На рис. 5 показаны температурные зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon(T)$ кристаллов TlInTe_2

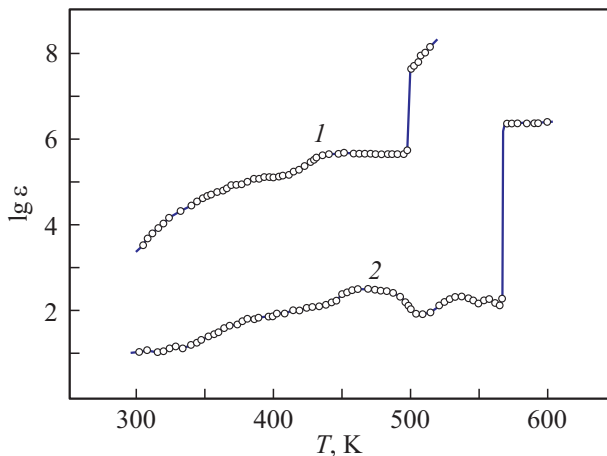


Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости кристаллов TlInTe_2 (1) и $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$ (2), где $x = 0.05$ в кристаллографическом направлении [001] при частоте 100 kHz.

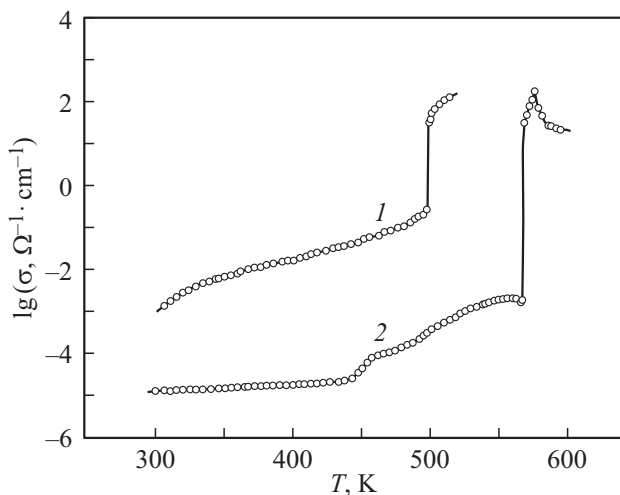


Рис. 6. Температурная зависимость удельной проводимости кристаллов TlInTe_2 (1) и $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$ (2) где $x = 0.05$ в кристаллографическом направлении [001] при частоте 100 kHz.

(кривая 1) и $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$ (кривая 2), где $x = 0.05$. Как видно из рис. 5 (кривая 1), в кристалле TlInTe_2 выше температуры 300 К наблюдается рост значений диэлектрической проницаемости, а при температуре 498 К происходит скачок значений ϵ на два порядка, и кристалл переходит в ионно-проводящее состояние. На рис. 5 на кривой 2 показана зависимость $\epsilon(T)$ образца $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$. В сравнении с кривой 1 выше 300 К наблюдаются меньшие почти на порядок значения ϵ . На кривой $\epsilon(T)$ имеется два максимума, плавный максимум в интервале 450–500 К, где наблюдается повышение значений ϵ почти на порядок и резкий скачок значений ϵ на четыре порядка при температуре 567 К. Очевидно, что легирование TlInTe_2 висмутом

влияет на температуру фазового перехода кристалла в ионно-проводящую фазу (T_i) повышая ее на 69 К.

На кривых температурной зависимости проводимости исследуемых образцов (рис. 6) при соответствующих температурах наблюдаются аномалии проводимости: для TlInTe_2 скачкообразный рост более чем на два порядка (рис. 6, кривая 1), и более чем на четыре порядка для $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$ (рис. 6, кривая 2).

Отметим, что аномалии на кривых $\epsilon(T)$ и $\sigma(T)$ наблюдаются и в кристаллографическом направлении (110) в образцах обоих составов. Для кристаллов TlInTe_2 она происходит при 485 К, а для $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$, при 572 К. Сравнивая значения T_i в направлениях [001] и [110], можно обнаружить, что легирование висмутом сильно влияет на диэлектрические свойства в обоих исследуемых кристаллографических направлениях, повышая T_i в направлении [001] на 69 К, а в направлении [110] — на 87 К.

4. Заключение

Таким образом, физико-химическими исследованиями сплавов системы $\text{TlInTe}_2\text{—Bi}$ в интервале концентраций 0–10 at.% Bi установлена растворимость висмута в TlInTe_2 в количестве 5.0 at.% при комнатной температуре.

Установлено, что в твердых растворах $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$ наблюдается незначительное увеличение значений плотности и микротвердости — с 100 kgf/mm² для TlInTe_2 до 114 kgf/mm² для $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$.

Результаты РФА показали, что с повышением концентрации Bi в составе α -твердых растворов значения параметров элементарной ячейки меняются незначительно.

На примере состава $(\text{TlInTe}_2)_{1-x}\text{Bi}_x$, где $x = 0.05$ показано, что примеси висмута повышают значение проводимости в направлении [001], приводят к изменению типа проводимости кристалла TlInTe_2 с дырочной на электронную, сильно повышают значение электрической анизотропии кристалла TlInTe_2 $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ более чем в 10^3 раз (см. таблицу).

Наблюдается также влияние примесей висмута на диэлектрические свойства кристаллов TlInTe_2 , при этом, образуя барьеры на пути движения ионов таллия, примеси висмута повышают температуру фазового перехода в ионно-проводящую фазу (T_i): в кристаллографическом направлении [001], на 69 К, а в направлении [110] — на 87 К.

Установлено, что атомы висмута, внедряясь в решетку TlInTe_2 , образуют твердые растворы внедрения, занимая октаэдрические пустоты между атомами таллия в кристаллографическом направлении [001] ($z = 0.5$).

Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы для разработки ионных проводников с управляемыми свойствами и сильно анизотропных материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- [1] D. Muller, G. Eulenberger, H. Hahn, Z. Anorg. Allg. Chem. **398**, 207 (1973).
- [2] Э.Ю. Салаев, К.Р. Аллахвердиев, Ш.Г. Гасымов, Т.Г. Мамедов. Авт. св-во СССР № 1182291 (1984).
- [3] И.Г. Исмаилзаде, О.А. Самедов, Н.А. Эюбова, И.М. Алиев, М.С. Гаджиев, О.А. Амиров. Патент № 4045089, 31 (1986).
- [4] G. Ding, J. He, Z. Cheng, X. Wang, S. Li. J. Mater. Chem. **6**, 13269 (2018).
- [5] I. Yucel, S. Çakmak. Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science. J. Sci., **12**, 30 (2017).
- [6] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Э.К. Гусейнов, Ф.Т. Салманов, Н.А. Алиева, Р.Ш. Агаева. ФТП **47**, 696 (2013).
- [7] O.Z. Alekperov, A.I. Najafov, E. Nakhmedov, O.A. Samedov, N.A. Aliyeva, G. Jafarova. J. Appl. Phys. **123**, 135701-9 (2018).
- [8] O.Z. Alekperov, E. Nakhmedov, A. Najafov, O. Samedov, Kh. Nadirova, V. Gasymov, G.R. Mahmudova. J. Phys. D **53**, 035103 (2020).
- [9] Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Ф.Т. Салманов, О.З. Алекперов, Э.К. Гусейнов, Н.А. Алиева. ФТП **11**, 1441 (2011).
- [10] Н.Х. Абрикосов, В.Ф. Банкаина, Л.В. Порецкая, Е.В. Скуднава, С.Н. Чижевская. Наука, М. (1975) 219 с.
- [11] А.И. Наджафов, Н.А. Алиева, К.Г. Халилова. ФТТ **9**, 1656 (2018).
- [12] М.П. Шаскольская. Кристаллография. Высш. шк., М. (1984). 376 с.
- [13] Н.С. Герасимова, Ю.Г. Головачева, Л.А. Московских. Определение микротвердости. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга (2017) 27 с.
- [14] Г.А. Ильинский. Определение плотности минералов. Недра, Л. (1975). 119 с.
- [15] В.Ф. Лысов. Практикум по физике полупроводников. Просвещение, М. (1976). 207 с.

Редактор Ю.Э. Китаев