

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ИСХОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ $\text{TlInSe}_2\text{--TiGaTe}_2$

© 2013 С. Н. Мустафаева<sup>1</sup>, М. М. Асадов<sup>2</sup>, А. И. Джаббаров<sup>1</sup>, Э. М. Керимова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Физики Национальной Академии Наук, пр. Г. Джавида, 33, AZ-1143 Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Институт Химических Проблем Национальной Академии Наук, пр. Г. Джавида, 29, AZ-1143 Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию 07.02.2013 г.

**Аннотация.** Выращены цепочечные монокристаллы твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TiGaTe}_2)_x$  ( $x=0.4$  и  $0.6$ ) с тетрагональной структурой. Проведенные измерения физических свойств полученных образцов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TiGaTe}_2)_{0.4}$  позволили определить диэлектрические характеристики и их частотную дисперсию, установить природу диэлектрических потерь, механизм переноса заряда на переменном токе. Оценены плотность и энергетический разброс локализованных состояний, среднее время и расстояние прыжков, а также концентрация глубоких ловушек, ответственных за ас-проводимость в образце  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TiGaTe}_2)_{0.4}$ . Измерена термо-э.д.с. в кристаллах  $(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TiGaTe}_2)_{0.6}$  и определен их тип проводимости.

**Ключевые слова:** твердые растворы,  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TiGaTe}_2)_x$ , электрические и диэлектрические свойства, постоянный и переменный ток.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интерес исследователей привлекают твердые растворы между различными по природе сложными полупроводниками с целью создания гетеропереходов, которые стали осуществимы в результате современных технологий. Тройные полупроводниковые соединения типа  $\text{TlV}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  ( $\text{V}^{\text{III}} = \text{In, Ga}; \text{C}^{\text{VI}} = \text{S, Se, Te}$ ), в частности цепочечные монокристаллы  $\text{TlInSe}_2$  [1–5] и  $\text{TiGaTe}_2$  [6–8] являются предметом многочисленных исследований.

Соединения  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$  являются структурными аналогами с тетрагональной сингонией, и поэтому в системе  $\text{TlInSe}_2\text{--TiGaTe}_2$  имеет место образование твердых растворов. Диаграмма состояния системы  $\text{TlInSe}_2\text{--TiGaTe}_2$  [9] характеризуется образованием непрерывного ряда твердых растворов (тв.р-р.). При этом ликвидус системы характеризуется узкой температурной областью равновесия тв. р-р.  $\text{TlInSe}_2$  – жидкость и тв. р-р.  $\text{TiGaTe}_2$  – жидкость и имеет минимум с координатами 45 мол.%  $\text{TiGaTe}_2$  и 973 К.

Проведенные экспериментальные исследования рентгенографических свойств [10], электропроводности и диэлектрических характеристик

$(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TiGaTe}_2)_x$  [11], а также термоэлектрических свойств монокристаллов твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.2}(\text{TiGaTe}_2)_{0.8}$  [12, 13] совместно с данными для индивидуальных соединений  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$  позволили с достаточной достоверностью полагать, что вдоль всей концентрационной области твердых растворов в системе  $\text{TlInSe}_2\text{--TiGaTe}_2$  физические свойства меняются закономерно в зависимости от состава.

Несомненный интерес представляет изучение твердых растворов разных типов, где один из халькогенов и металлов заменяются другими. В данной работе в качестве объекта исследований выбраны ранее не изученные твердые растворы  $(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TiGaTe}_2)_{0.6}$  и  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TiGaTe}_2)_{0.4}$ , составы которых находятся в области гомогенности на основе соответствующих исходных тройных соединений. Ниже приводятся результаты изучения электропроводности на постоянном и переменном токе, диэлектрических и термоэлектрических свойств твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TiGaTe}_2)_x$  ( $x=0.4$  и  $0.6$ ).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TiGaTe}_2)_x$  ( $x=0.4$  и  $0.6$ ) получали сплавлением стехиометрических навесок заранее приготовленных исходных

компонентов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  в вакуумированных до  $10^{-3}$  Па и запаянных кварцевых ампулах. Для приготовления  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  использовали таллий марки Тl-000, In-000, Ga-000, теллур ТВ-3 и селен ОСЧ-16-4 с содержанием примеси не выше  $5 \times 10^{-4}$  мас. %. Образцы при периодическом перемешивании выдерживали 6–8 ч при температуре, на 25–30 К превышающей температуру ликвидуса, и затем выжидали остывания их до комнатной температуры. Индивидуальность соединений  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  контролировали методами дифференциального термического анализа (ДТА) и рентгенофазового анализа с последующим сопоставлением полученных данных с литературными. Температура плавления  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  составила соответственно 1040 и 1048 К. Рентгеновские рефлексы на дифрактограммах индицировались в тетрагональной сингонии.

Из синтезированных образцов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TlGaTe}_2)_{0.6}$  и  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  методом Бриджмена-Стокбаргера были выращены их монокристаллы. Синтезированный образец соответствующего состава измельчали и в измельченном виде помещали в кварцевую ампулу длиной 8–10 см, внутренним диаметром 1 см и заостренным концом. Вакуумированную до остаточного давления не хуже  $10^{-3}$  Па кварцевую ампулу с об-

разцом помещали в двухтемпературную печь установки для выращивания монокристалла. В процессе выращивания кристалла из расплава в верхней зоне печи поддерживалась температура  $1063 \pm 10$  К (выше температуры плавления исходных соединений), а в нижней зоне –  $953 \pm 10$  К (ниже температуры плавления исходных соединений). Скорость перемещения ампулы в печи составляла 0.3–0.5 см/ч, а градиент температуры у фронта кристаллизации  $25 \pm 5$  К. Указанная выше скорость перемещения ампулы в печи оказалась оптимальной для роста зародыша монокристалла.

Для определения параметров элементарной ячейки синтезированных фаз рентгенографические измерения проводились на порошковых образцах, полученных путем растирания выращенных монокристаллов соответствующих фаз. Дифрактограммы порошковых образцов записывались на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение) при комнатной температуре. Рентгенографические данные изученных фаз и исходных соединений системы  $\text{TlInSe}_2$ – $\text{TlGaTe}_2$  с координационным числом 4 приведены в таблице. Как видно из таблицы, оба соединения кристаллизуются в тетрагональной структуре типа  $\text{TlSe}$  и имеют близкие параметры решетки.

**Таблица.** Рентгенографические данные изученных фаз и исходных соединений системы  $\text{TlInSe}_2$ – $\text{TlGaTe}_2$

Фаза	Тип решетки и пр. гр.	$a$ , Å	$c$ , Å
$\text{TlInSe}_2$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18} - I4/mcm$	$8.084 \pm 0.002$	$6.844 \pm 0.004$
$\text{TlGaTe}_2$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18} - I4/mcm$	$8.430 \pm 0.002$	$6.858 \pm 0.004$
$(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TlGaTe}_2)_{0.6}$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18} - I4/mcm$	$8.282 \pm 0.002$	$6.817 \pm 0.004$
$(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18} - I4/mcm$	$8.266 \pm 0.002$	$6.826 \pm 0.004$

Поверхности полученных цепочечных монокристаллов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  ( $x = 0.4$  и  $0.6$ ) были зеркально-гладкими, что позволило использовать их для исследований без какой-либо дополнительной обработки.

Изучение электрических и диэлектрических свойств кристаллов проводили по методике, описанной в [14, 15]. Образцы из  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  для электрических и диэлектрических измерений на переменном токе были изготовлены в виде плоских конденсаторов. В качестве электродов использована серебряная паста. Толщина кристаллических пластинок из  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  составляла 400 мкм. Геометрическая конфигурация этих образцов была такова, что переменное электрическое поле прикладывалось поперек естественных

цепей кристаллов (т.е. поперек направления [110]). В процессе электрических измерений образцы помещались в экранированную камеру. Диэлектрические коэффициенты кристаллов измерены резонансным методом с помощью куметра TESLA 560. Диапазон частот переменного электрического поля составлял  $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц. Точность определения резонансных значений емкости и добротности ( $Q = 1/\text{tg}\delta$ ) измерительного контура была ограничена ошибками, связанными со степенью разрешения отсчетов по приборам. Градуировка конденсатора имела точность  $\pm 0.1$  пкФ. Воспроизводимость положения резонанса составляла по емкости  $\pm 0.2$  пкФ, а по добротности  $\pm 1.0$ – $1.5$  деления шкалы. При этом наибольшие отклонения от средних значений составляли 3–4% для  $\epsilon$  и 7% для

tgδ. Все измерения на переменном токе проведены при комнатной температуре.

Приготовленные образцы из  $(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TlGaTe}_2)_{0.6}$  для электрических измерений на постоянном токе имели форму параллелепипеда размерами  $3.86 \times 2.75 \times 5.67$  мм. Омические контакты к образцам создавали путем электролитического осаждения меди на боковые торцы так, что постоянный электрический ток был направлен вдоль естественных цепей кристаллов, т.е. вдоль направления [110]. Электрическая проводимость и коэффициенты термо-э.д.с. полученных образцов измерены четырехзондовым методом [13] с точностью до 1% в температурном диапазоне 286—400 К.

Напряженность переменного и постоянного электрического поля, приложенного к образцам,

соответствовала омической области их вольт-амперных характеристик.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полученных монокристаллах твердых растворов состава  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  изучена частотная дисперсия действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ) и ас-проводимости ( $\sigma_{ac}$ ) в области частот 50 кГц-35 МГц. Частотная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) во всей изученной области частот претерпевала незначительную дисперсию, изменяясь от 69 до 50 (рис. 1 а).

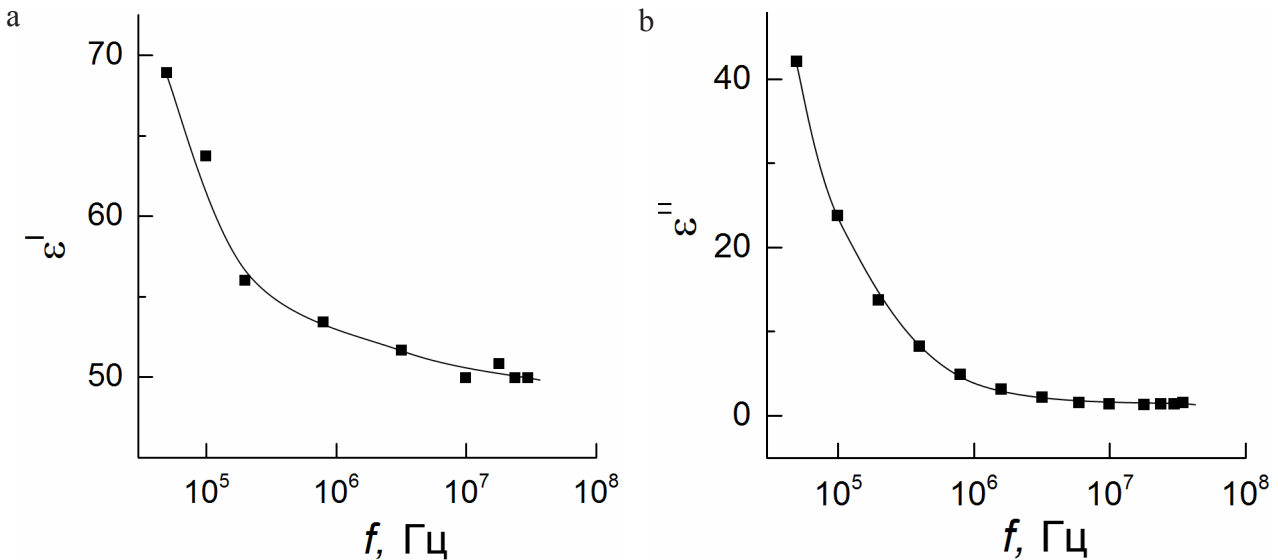


Рис. 1. Частотная дисперсия действительной (а) и мнимой (б) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$

В отличие от  $\epsilon''$  мнимая составляющая комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon''$ ) претерпевала существенную дисперсию, уменьшаясь в 30 раз при увеличении частоты (рис. 1 б).

Наблюдаемое в экспериментах монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости по мере увеличения частоты свидетельствует о релаксационной дисперсии в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$ .

Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  (рис. 2) также носила спадающий характер. Форма экспериментальной кривой tgδ( $f$ ), а именно гиперболический спад tgδ по мере увеличения частоты свидетельствует о потерях на электропроводность [16] в изученной области частот.

Экспериментальные результаты изучения частотно-зависимой ас-проводимости  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  (рис. 3) показали, что в частотной области  $5 \cdot 10^4 - 3.2 \cdot 10^6$  Гц  $\sigma_{ac}$  увеличивалась по мере роста частоты по степенному закону:  $\sigma_{ac} \sim f^{0.3}$ . При более высоких частотах, т.е. при  $f > 3.2 \cdot 10^6$  Гц наблюдался переход к более крутой зависимости  $\sigma_{ac}(f)$ . Показатель степени составлял 0.8, т.е.  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ . Обычная ас-проводимость зонного типа является в основном частотно-независимой вплоть до  $10^{10} - 10^{11}$  Гц. Наблюдаемая нами экспериментальная зависимость  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$  свидетельствует о том, что она обусловлена прыжками носителей заряда между локализованными в запрещенной зоне состояниями. Это могут быть локализованные вблизи краев

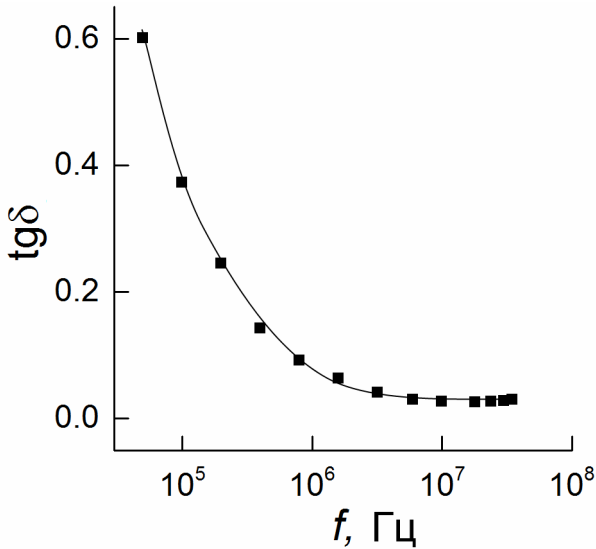


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в твердом растворе  $(\text{TlInSe}_2)_{0,6}(\text{TlGaTe}_2)_{0,4}$  от частоты переменного электрического поля

разрешенных зон состояния или локализованные вблизи уровня Ферми состояния [17]. В экспериментальных условиях проводимость по состояниям вблизи уровня Ферми всегда доминирует над проводимостью по состояниям вблизи краев разрешенных зон. Т.е. зависимость  $\sigma_{ac}(f)$  при переносе заряда по состояниям в окрестности уровня Ферми переходит в асимптотический предел  $f^{0,8}$  при более низких частотах, чем проводимость, связанная с перескоками носителей заряда с энергиями вблизи края зоны. Поэтому полученный нами закон  $\sigma_{ac} \sim f^{0,8}$  свидетельствует о прыжковом механизме переноса заряда по состояниям, локализованным в окрестности уровня Ферми, т.е. о моттовской проводимости [17].

Локализованные уровни обусловлены присутствием в кристаллах структурных дефектов, таких как вакансии, примеси внедрения и дислокации. Роль этих дефектов особенно высока для материалов со слоистой или цепочечной структурой. Существованием таких дефектов объясняется, в частности, высокая плотность состояний вблизи уровня Ферми. Достаточно высокая концентрация локализованных состояний в запрещенной зоне приближает слоистые и цепочечные кристаллы по энергетической структуре к аморфным полупроводникам.

По экспериментально найденным значениям  $\sigma_{ac}(f)$  с помощью формулы Мотта вычислили плотность состояний вблизи уровня Ферми:

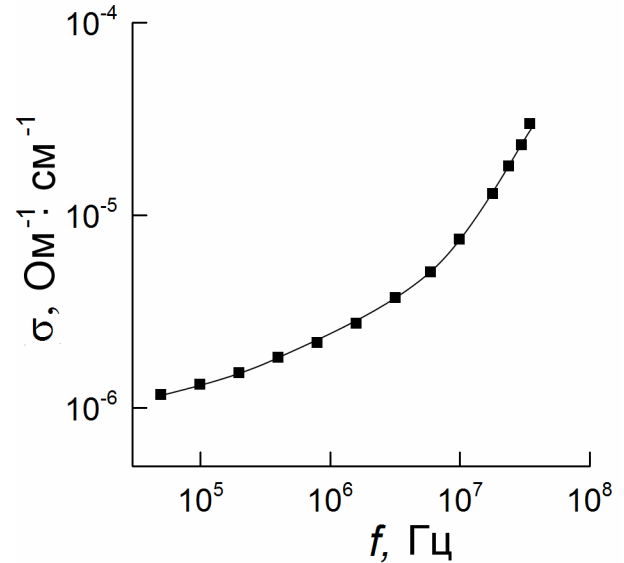


Рис. 3. Частотно-зависимая ас-проводимость твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0,6}(\text{TlGaTe}_2)_{0,4}$  при  $T = 300 \text{ K}$

$$\sigma_{ac}(f) = \frac{\pi^3}{96} e^2 k T N_F^2 a^5 f \left[ \ln \left( \frac{v_{ph}}{f} \right) \right]^4, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $N_F$  — плотность состояний вблизи уровня Ферми;  $a = 1/\alpha$  — радиус локализации;  $\alpha$  — постоянная спада волновой функции локализованного носителя заряда  $\psi \sim e^{-\alpha r}$ ;  $v_{ph}$  — фононная частота.

Вычисленное значение  $N_F$  для твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0,6}(\text{TlGaTe}_2)_{0,4}$  составляло  $N_F = 5.8 \times 10^{18} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ . При вычислении  $N_F$  для радиуса локализации взято значение  $a = 25 \text{ \AA}$  по аналогии с  $\text{TlGaTe}_2$  [7]. Значение  $v_{ph}$  взято равным  $10^{12} \text{ Гц}$ .

Согласно теории прыжковой проводимости на переменном токе среднее расстояние прыжков ( $R$ ) определяется по следующей формуле:

$$R = \frac{1}{2\alpha} \ln \left( \frac{v_{ph}}{f} \right). \quad (2)$$

Вычисленное по формуле (2) значение  $R$  для  $(\text{TlInSe}_2)_{0,6}(\text{TlGaTe}_2)_{0,4}$  составляло  $141 \text{ \AA}$ . Это значение  $R$  в 5.6 раз превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда в изученном твердом растворе. Значение  $R$  позволило по формуле:

$$\tau^{-1} = v_{ph} \cdot \exp(-2\alpha R) \quad (3)$$

определить среднее время прыжков:  $\tau = 7.4 \times 10^{-8} \text{ с}$ .

По формуле [17]:

$$\Delta E = 3 / 2\pi R^3 \cdot N_F \quad (4)$$

в  $(\text{TlInSe}_2)_{0,6}(\text{TlGaTe}_2)_{0,4}$  оценен энергетический разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний:  $\Delta E = 29$  мэВ. А по формуле:

$$N_i = N_F \times \Delta E \quad (5)$$

определена концентрация глубоких ловушек, ответственных за ас-проводимость изученных кристаллов:  $N_i = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Проведены также измерения электропроводности вдоль направления [110] цепочечных кристаллов  $\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$  на постоянном токе. Все электрические измерения проведены в температурном интервале 286 – 400 К. Температурная зависимость проводимости  $(\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$  в указанном диапазоне температур приведена на рис. 4.

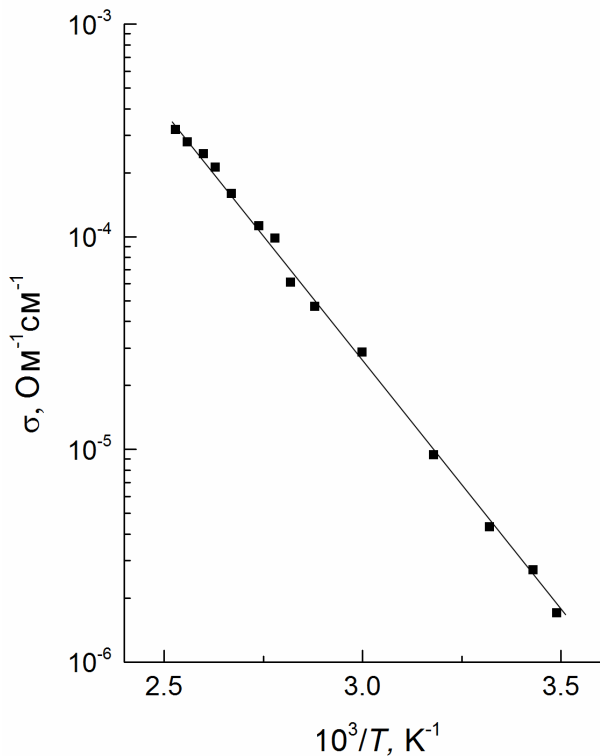


Рис. 4. Температурная зависимость проводимости твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$  на постоянном токе в координатах Аррениуса

Из рис. 4 видно, что проводимость изученного кристалла экспоненциально возрастала с увеличением температуры. Определенная из наклона этой зависимости энергия активации проводимости составляла 0.47 эВ.

Измерены также термоэлектрические свойства твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$ . Анализ температурной зависимости коэффициента термоэдс ( $\alpha$ ) (рис. 5) показал, что при  $T = 291$  К  $\alpha = 698$  мкВ/К.

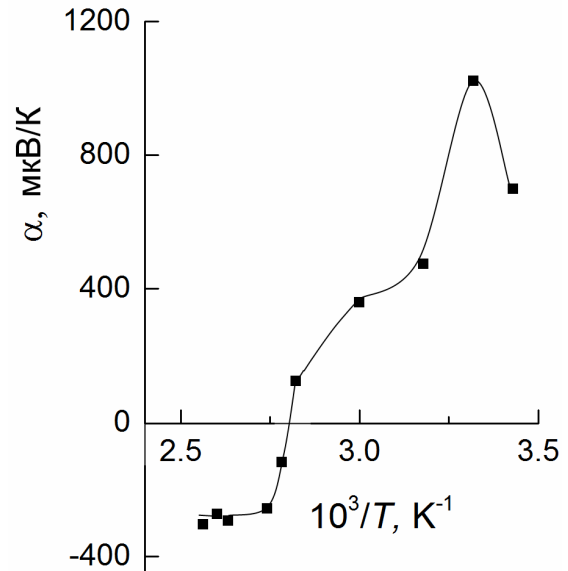


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента термоэдс в твердом растворе  $(\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$

При повышении температуры значение  $\alpha$  вначале возрастало, достигая максимального значения 1020 мкВ/К при 300 К, а затем имела место обратная пропорциональная зависимость  $\alpha$  от температуры [17]:

$$\alpha = \frac{\kappa}{e} \left[ \frac{E}{kT} - \frac{\gamma}{k} + 1 \right], \quad (6)$$

где  $\gamma$  – температурный коэффициент энергии активации проводимости,  $e$  – заряд электрона,  $\kappa$  – постоянная Больцмана.

Обратно пропорциональная зависимость  $\alpha$  от температуры свидетельствует о том, что в проводимости этого твердого раствора в данной температурной области доминируют носители заряда, возбужденные в разрешенную зону.

При  $T = 357$  К величина  $\alpha$  спадала до нуля, а при  $T > 357$  К имела место инверсия знака термоэдс., т.е. проводимость твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0,4}(\text{TlGaTe}_2)_{0,6}$  переходила от  $p$ -типа к  $n$ -типу. С дальнейшим повышением температуры (выше 365 К) температурная зависимость термоэдс. ослабевала. Такое поведение хода кривой  $\alpha(T)$  при высоких температурах обычно описывается зависимостью [17]:  $\alpha \approx \ln T + const$ .

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при синтезе составов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  ( $x=0.4$  и  $0.6$ ) образуются твердые растворы с тетрагональной сингонией. Изучены электрические и диэлектрические свойства выращенных цепочечных монокристаллов на постоянном и переменном токе. Установлены закономерности частотной дисперсии действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  ( $f$ ) и ас-проводимости ( $\sigma_{ac}$ ) в области частот  $f=5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц. Обнаружено, что диэлектрические потери в образцах  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$  обусловлены сквозной проводимостью. В диапазоне частот  $f=3.2 \times 10^6 - 3.5 \times 10^7$  Гц их ас-проводимость подчинялась закономерности  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ , характерной для прыжкового механизма переноса заряда по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Оценены плотность ( $N_F$ ) и энергетический разброс ( $\Delta E$ ) этих состояний  $N_F = 5.8 \times 10^{18} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$ ,  $\Delta E = 29 \text{ мэВ}$ , среднее время ( $\tau$ ) и расстояние ( $R$ ) прыжков  $\tau = 7.4 \times 10^{-8} \text{ с}$  и  $R = 141 \text{ \AA}$ , а также концентрация глубоких ловушек  $N_t = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , ответственных за ас-проводимость кристаллов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.6}(\text{TlGaTe}_2)_{0.4}$ .

Установлено, что знак термо-э.д.с. в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.4}(\text{TlGaTe}_2)_{0.6}$  в диапазоне температур 291—357 К был положительным, а при  $T > 357 \text{ К}$  имела место инверсия знака термо-э.д.с., т.е. проводимость кристалла переходила от  $p$ -типа к  $n$ -типу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mustafaeva S. N., Ramazanzade V. A., Asadov M. M.* // Mater. Chem. Phys. 1995. V. 40. № 2. P. 142—145.
2. *Мустафаева С. Н., Асадов М. М., Исмаилов Д. И.* // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы. 1990. Т. 26. № 11. С. 2288—2290.
3. *Mustafaeva S. N., Kerimova E. M., Asadov M. M., et al.* // Fizika. 2003. V. 9. № 3,4. P. 62—64.

4. *Mustafaeva S. N.* // Book of Abstracts. 16<sup>th</sup> International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-16). Technical University Berlin, Germany. Sept. 15—19, 2008. ID:23.

5. *Шелег А. У., Гуртовой В. Г., Мустафаева С. Н. и др.* // ФТТ. 2011. Т. 53. № 3. С. 443—445.

6. *Mustafaeva S. N., Gasymov Sh. G., Kerimova E. M.* // Abstracts of 17<sup>th</sup> International Conference on Ternary and Multinary Compounds. (ICTMC 17). Baku. Azerbaijan. 27—30 Sept., 2010. P. 105.

7. *Mustafaeva S. N., Gasymov Sh. G., Kerimova E. M., et al.* // J. Phys. Chem. Solids. 2011. V. 72. № 6. P. 657—660.

8. *Мустафаева С. Н., Гасымов Ш. Г. и др.* // ФТТ. 2012. Т. 54. № 1. С. 43—45.

9. *Abdinbekov S. S., Guseinov G. D.* Physico-chemical investigations of  $\text{TlInSe}_2$ - $\text{TlGaTe}_2$  // Bull. Soc. Chim. Fr. 1986. № 3. P. 355—357.

10. *Шелег А. У., Зуб Е. М., Ячковский А. Я. и др.* // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 332—334.

11. *Шелег А. У., Гуртовой В. Г., Мустафаева С. Н. и др.* // Изв. НАН Беларуси. 2012. № 1. С. 106—109.

12. *Mustafaeva S. N., Jabbarov A. I.* // Abstracts of 17<sup>th</sup> International Conference on Ternary and Multinary Compounds. (ICTMC 17). Baku. Azerbaijan. 27—30 Sept., 2010. P. 189.

13. *Мустафаева С. Н., Джаббарлы А. И., Керимова Э. М.* // Сб. док. Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела ФТТ-2009». Минск. Беларусь. 20—23 окт. 2009. Т. 2. С. 127—129.

14. *Мустафаева С. Н.* // Fizika. 2008. V. XIV. № 3. С. 189—191.

15. *Мустафаева С. Н.* // Неорган. материалы. 2010. Т. 46. № 2. С. 145—148.

16. *Пасынков В. В., Сорокин В. С.* Материалы электронной техники. М.: Высш. шк., 1986. 368 с.

17. *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических материалах. М.: Мир, 1974. 472 с.

*Мустафаева Солмаз Наримановна* — д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт физики НАН Азербайджана; e-mail: solmust@gmail.com

*Асадов Мирсалим Мираламоглы* — д.х.н., зав. сектором, Институт химических проблем НАН Азербайджана; e-mail: mirasadov@gmail.com

*Джаббаров Айдын И.* — к.ф.-м.н., с.н.с., Институт физики НАН Азербайджана; e-mail: solmust@gmail.com

*Керимова Элмира Маммадалиевна* — д.ф.-м.н., гл.н.с., Институт физики НАН Азербайджана; e-mail: solmust@gmail.com

*Mustafaeva Solmas N.* — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Main Researcher, Institute of Physics NAN of Azerbaijan; e-mail: solmust@gmail.com

*Asadov Mirsalim M.* — Dr. Sci. (Chem.), Head of the sector, Institute of Chemical Problems NAN of Azerbaijan; e-mail: mirasadov@gmail.com

*Jabbarov Aydin I.* — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Institute of Physics NAN of Azerbaijan; e-mail: solmust@gmail.com

*Kerimova Elmira M.* — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Main Researcher, Institute of Physics NAN of Azerbaijan; e-mail: solmust@gmail.com