

03

## Диэлектрические свойства и перенос заряда в $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ на постоянном и переменном токе

© С.Н. Мустафаева<sup>1</sup>, М.М. Асадов<sup>2</sup>, А.И. Джаббаров<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан<sup>2</sup> Институт химических проблем НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

E-mail: solmust@gmail.com, mirasadov@gmail.com

(Поступила в Редакцию 18 декабря 2013 г.)

Приведены экспериментальные результаты изучения температурной и частотной зависимостей проводимости на постоянном и переменном токе, дисперсии диэлектрических коэффициентов выращенных монокристаллов твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ . Установлены природа диэлектрических потерь, прыжковый механизм переноса заряда, оценены параметры локализованных состояний, такие как плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми и их разброс, среднее время и длина прыжков носителей заряда, а также концентрация глубоких ловушек, ответственных за проводимость на постоянном и переменном токе.

### 1. Введение

Группа таллиевых халькогенидных соединений типа  $\text{TlB}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  ( $B = \text{In}, \text{Ga}, C = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ), к которым относятся монокристаллы  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$ , обладают ярко выраженной слоисто-цепочечной структурой. Они характеризуются анизотропными физическими свойствами, обусловленными тем, что носители заряда в них могут свободно двигаться внутри слоев (цепей), а между слоями (цепями) их движение ограничено из-за вандер-ваальсового взаимодействия и малого перекрытия волновых функций соседних слоев (цепей). Тройные полупроводниковые кристаллы  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  с цепочечной структурой активно исследуются. В частности, для монокристалла  $\text{TlInSe}_2$  изучены электрические, фотоэлектрические свойства и свойства, которые могут быть использованы в дозиметрии рентгеновского диапазона, а также исследовано влияние на эти монокристаллы интеркалирования ионами лития [1]. В [2] изучено влияние примесей Ag, Cu и Au на электрические свойства монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$ , а в [3,4] представлены результаты изучения электрических свойств монокристаллов  $\text{TlGaTe}_2$  под воздействием гидростатического давления. В [5] изучены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  в переменных электрических полях. Было обнаружено, что в  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  существует последовательность фазовых переходов в области низких температур. Для расширения класса указанных полупроводниковых кристаллов, варьирования и управления их физическими параметрами представляет интерес исследовать возможность одновременного анион-катионного замещения в соединениях  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  с тетрагональной структурой и изучить образующиеся при этом твердые растворы сложного состава. В [6] было установлено, а в [7] подтверждено наличие непрерывного ряда твердых раство-

ров в системе  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$ . Рентгенографическим методом в области температур 85–320 К были определены концентрационные зависимости параметров элементарной ячейки полученных кристаллов системы  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  [7]. В результате проведенных исследований температурных зависимостей электропроводности и диэлектрической проницаемости кристаллов твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  в области температур 80–300 К было установлено, что проводимость исследованных кристаллов увеличивается с ростом температуры и частоты приложенного электрического поля, а диэлектрическая проницаемость уменьшается с увеличением частоты и концентрации  $\text{TlGaTe}_2$  [8]. Установлено, что температура фазовых переходов в системе твердых растворов  $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  с ростом концентрации  $\text{TlGaTe}_2$  уменьшается.

Целью настоящей работы являются определение диэлектрических параметров монокристалла твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  и установление механизма проводимости в нем на постоянном и переменном токе.

### 2. Эксперимент

Образцы твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  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, индий, галлий марок Тl-000, In-000, Ga-000, теллур ТВ-3 и селен ОСЧ-16-4 с содержанием примеси не выше  $5 \cdot 10^{-4}$  mass%. Образцы при периодическом перемешивании выдерживали 6–8 h при температуре, на 25–30 К превышающей температуру ликвидуса, и затем ожидали их остывания до комнатной температуры. Индивидуальность соединений  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  контролировали

Рентгенографические данные для исходных тройных соединений и твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  системы  $\text{TlInSe}_2-\text{TlGaTe}_2$

Фаза	Тип решетки и пространственная группа	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$
$\text{TlInSe}_2$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18}-I4/mcm$	$8.084 \pm 0.002$	$6.844 \pm 0.004$
$\text{TlGaTe}_2$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18}-I4/mcm$	$8.430 \pm 0.002$	$6.858 \pm 0.004$
$(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$	Тетрагональный, $D_{4h}^{18}-I4/mcm$	$8.403 \pm 0.002$	$6.840 \pm 0.004$

методами дифференциального термического анализа и рентгенофазового анализа с последующим сопоставлением полученных данных с литературными. Температура плавления  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  составила 1040 и 1048 К соответственно. Дифрактограммы порошковых образцов записывались на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение) при комнатной температуре. Рентгеновские рефлексы на дифрактограммах образцов индифферировались в тетрагональной сингонии. Из синтезированных образцов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  методом Бриджмена–Стокбаргера были выращены монокристаллы. Синтезированный образец измельчали и затем помещали в кварцевую ампулу длиной 8–10 см с внутренним диаметром 1 см и заостренным концом. Откачанную до остаточного давления не хуже  $10^{-3}$  Па кварцевую ампулу с образцом помещали в двухтемпературную электропечь 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 [9].

Для определения параметров элементарной ячейки синтезированного  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  рентгенографические измерения проводились на порошковых образцах, полученных путем растирания выращенного монокристалла. Рентгенографические данные изученных фаз и исходных соединений системы  $\text{TlInSe}_2-\text{TlGaTe}_2$  с координационным числом 4 приведены в таблице [7]. Как видно из таблицы, оба соединения кристаллизуются в тетрагональной структуре типа  $\text{TlSe}$  и имеют близкие параметры кристаллической решетки.

Поверхности полученных цепочечных образцов монокристалла  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  были зеркально-гладкими, что позволило использовать их для исследований без дополнительной обработки.

Образцы  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  для электрических измерений на постоянном токе были изготовлены в такой конфигурации, что внешнее постоянное электрическое поле было приложено вдоль цепей кристалла. Electroды к образцам получали электролитическим осаждением меди на боковые грани кристаллов. Расстояние между электродами составляло 9 мм. Напряженность приложенного к кристаллам электрического поля со-

ответствовала омической области вольт-амперной характеристики. Температурный интервал электрических измерений на постоянном токе составлял 172–373 К. Образцы  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  для электрических измерений на переменном токе были изготовлены в виде конденсаторов так, что перенос заряда в них осуществлялся поперек цепей кристалла. В качестве электродов использовалась серебряная паста. Толщина кристаллов составляла  $\sim 450 \mu\text{m}$ . Диэлектрические коэффициенты кристаллов  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  были измерены резонансным методом [10] с помощью куметра TESLA VM 560. Диапазон частот переменного электрического поля составлял  $5 \cdot 10^4 - 3.5 \cdot 10^7$  Hz. Все диэлектрические измерения проводились при 300 К. Воспроизводимость положения резонанса составляла по емкости  $\pm 0.2$  pF, а по добротности ( $Q = 1/\text{tg } \delta$ ) —  $\pm 1.0 - 1.5$  деления шкалы. При этом наибольшие отклонения от средних значений составляли 3–4% для  $\epsilon$  и 7% для  $\text{tg } \delta$ .

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена температурная зависимость омической проводимости твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  на постоянном токе ( $\sigma_{\text{dc}}$ ) в координатах  $\lg \sigma - 10^3/T$ . В области температур 290–373 К на зависимости наблюдается длинный экспоненциальный участок. Наклон этого участка составляет 0.36 eV. При уменьшении температуры энергия активации проводимости не имеет постоянного наклона, т.е. непрерывно уменьшается с уменьшением температуры вплоть до 172 К. Значения проводимости в этой области, перестроенные в координатах  $\lg \sigma - T^{-1/4}$  (рис. 2), ложатся на прямую с наклоном  $T_0 = 2.2 \cdot 10^6$  К. Проводимость подобного типа, когда энергия активации монотонно уменьшается с температурой, осуществляется прыжками носителей заряда по состояниям, лежащим вблизи уровня Ферми [11],

$$\sigma \sim \exp[-(T_0/T)^{1/4}], \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{16}{N_F k a^3}, \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $a$  — радиус локализации,  $N_F$  — плотность состояний вблизи уровня Ферми.

Из формулы (2) можно оценить плотность локализованных состояний  $N_F$  в монокристалле  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ :  $N_F = 5.5 \cdot 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ . При оценке  $N_F$  для радиуса локализации использовалось

значение  $a = 25 \text{ \AA}$ , которое было экспериментально получено для монокристалла  $\text{TlGaTe}_2$  [4].

Также были оценены длины прыжков  $R$  носителей заряда при различных температурах

$$R = \frac{3}{8} a T_0^{1/4} T^{-1/4}. \quad (3)$$

При  $T = 172 \text{ K}$   $R = 106 \text{ \AA}$ , а при  $T = 250 \text{ K}$   $R = 88 \text{ \AA}$ , так что средняя длина прыжков в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$

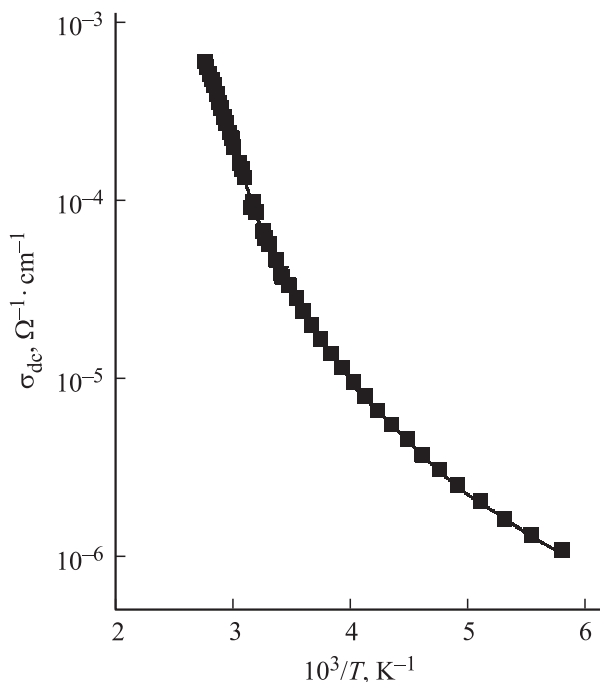


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  в координатах Аррениуса.

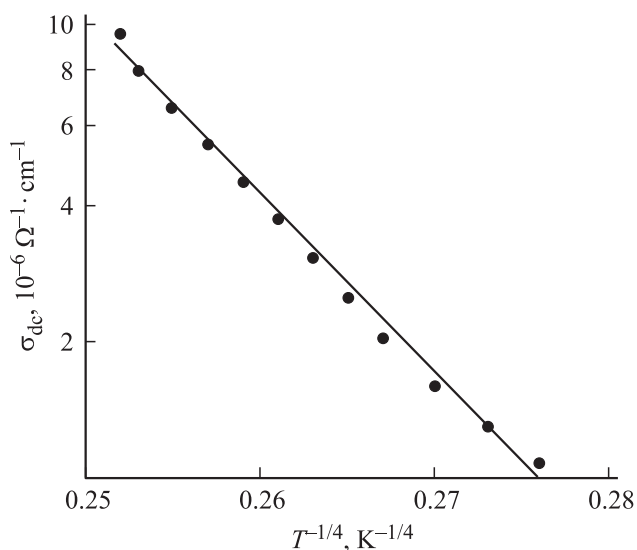


Рис. 2. Низкотемпературная проводимость твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ , перестроенная по экспериментальным данным в координатах Мотта.

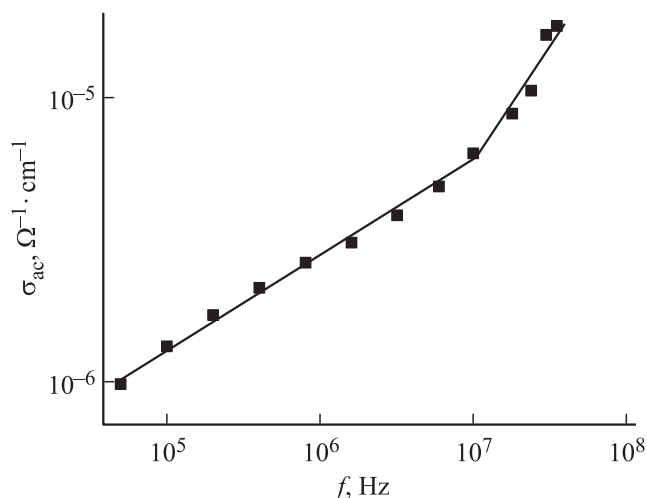


Рис. 3. Экспериментально полученная частотно-зависимая проводимость твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  при  $T = 300 \text{ K}$ .

в области температур  $172\text{--}250 \text{ K}$  составляет  $R_{\text{av}} = 97 \text{ \AA}$ . Значение  $R_{\text{av}}$  в 3.5 раза превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда, т.е.  $R_{\text{av}}/a = 3.5$ .

Из приведенного в [11] условия

$$\frac{4\pi}{3} R^3 N_F \frac{\Delta E}{2} = 1 \quad (4)$$

можно оценить разброс ловушечных состояний вблизи уровня Ферми:  $\Delta E = 96 \text{ meV}$ . Концентрация глубоких ловушек ( $N_t = N_F \Delta E$ ) в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  составляла  $N_t = 5.3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

Согласно [12], температурная зависимость энергии активации в области действия прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка описывается соотношением

$$\Delta W = \frac{(kT)^{3/4}}{(N_F a^3)^{1/4}}. \quad (5)$$

Определенная по формуле (5) энергия активации прыжков в твердом растворе  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  составила  $78 \text{ meV}$  при  $172 \text{ K}$  и  $88 \text{ meV}$  при  $200 \text{ K}$ .

Таким образом, в температурной области  $172\text{--}250 \text{ K}$  в твердом растворе  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по состояниям, локализованным вблизи уровня Ферми.

Представляло интерес изучение прыжковой проводимости в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  также в переменных электрических полях ( $\sigma_{\text{ac}}$ ). На рис. 3 приведена частотная зависимость проводимости на переменном токе твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  при  $T = 300 \text{ K}$ . Во всей изученной частотной области проводимость в зависимости от частоты описывается степенным законом  $\sigma_{\text{ac}} \sim f^n$ , где  $n = 0.3$  при  $f = 5 \cdot 10^4\text{--}10^7 \text{ Hz}$  и  $n = 0.8$  при  $f > 10^7 \text{ Hz}$ .

Как известно, проводимость на переменном токе зонного типа является в основном частотно-независимой

вплоть до  $10^{10} - 10^{11}$  Hz. 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 состояния, локализованные вблизи краев разрешенных зон или локализованные вблизи уровня Ферми [11]. Но так как в экспериментальных условиях проводимость по состояниям вблизи уровня Ферми всегда доминирует над проводимостью по состояниям вблизи краев разрешенных зон, полученный нами закон  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$  свидетельствует о прыжковом механизме переноса заряда по состояниям, локализованным в окрестности уровня Ферми [13]:

$$\sigma_{ac}(f) = \frac{\pi^3}{96} e^2 k T N_F^2 a^5 f \left[ \ln \left( \frac{v_{ph}}{f} \right) \right]^4, \quad (6)$$

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

Согласно (6), проводимость зависит от частоты как  $f [\ln(v_{ph}/f)]^4$ , т.е. при  $f \ll v_{ph}$  величина  $\sigma_{ac}$  приблизительно пропорциональна  $f^{0.8}$ . С помощью формулы (6) по экспериментальным значениям  $\sigma_{ac}(f)$  можно вычислить плотность состояний на уровне Ферми. Значение  $N_F$  для твердого раствора  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$  составляет  $N_F = 5.2 \cdot 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Это значение находится в хорошем согласии со значением  $N_F$ , полученным из измерений на постоянном токе ( $N_F = 5.5 \cdot 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

Согласно теории прыжковой проводимости, на переменном токе средняя длина прыжков  $R$  определяется по следующей формуле:

$$R = \frac{1}{2\alpha} \ln \left( \frac{v_{ph}}{f} \right). \quad (7)$$

Вычисленное по формуле (7) значение  $R$  для твердого раствора  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$  составляет 135 Å. Значение  $R$  позволило по формуле

$$\tau^{-1} = v_{ph} \exp(-2\alpha R) \quad (8)$$

определить среднее время прыжков в  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$ :  $\tau = 4.4 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ .

По формуле, приведенной в [11],

$$\Delta E = 3/2\pi R^3 N_F, \quad (9)$$

в монокристалле твердого раствора  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$  нами был оценен энергетический разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний:  $\Delta E = 37 \text{ meV}$ .

Определена также концентрация глубоких ловушек в твердом растворе  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$ , ответственных за проводимость на переменном токе:  $N_t = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

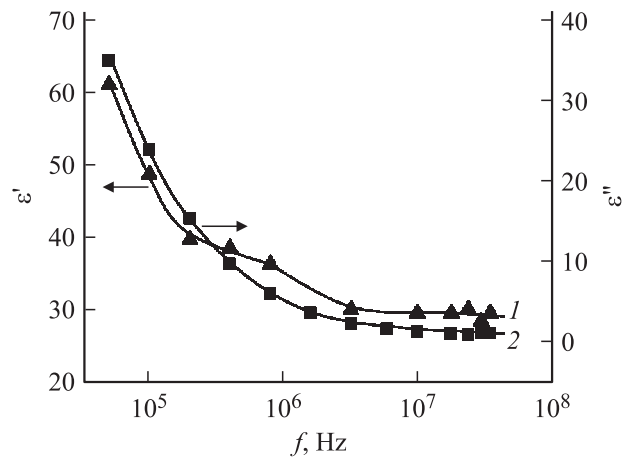


Рис. 4. Частотная дисперсия действительной  $\epsilon'$  (1) и мнимой  $\epsilon''$  (2) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости твердого раствора  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$ .  $T = 300 \text{ K}$ .

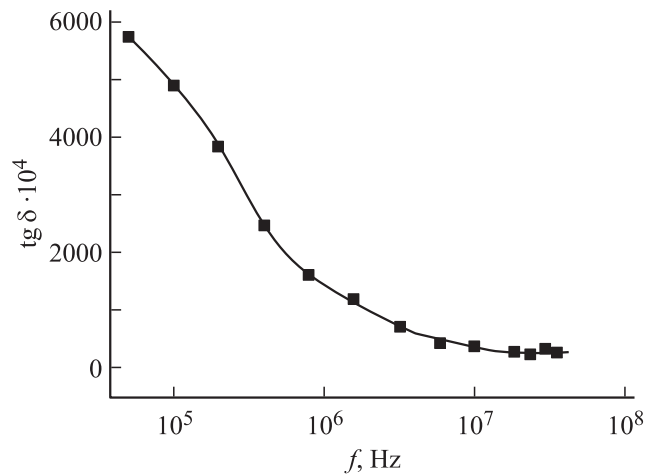


Рис. 5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$  от частоты.

Изучены также частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) в твердом растворе  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$ . На рис. 4 приведены экспериментально полученные частотные зависимости действительной ( $\epsilon'$ ) (кривая 1) и мнимой ( $\epsilon''$ ) (кривая 2) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости изученного твердого раствора при 300 K. Как видно из рис. 4, обе зависимости имеют монотонно спадающий характер при возрастании частоты от  $5 \cdot 10^4$  до  $3.5 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ . При этом если значение  $\epsilon'$  с ростом частоты в указанном интервале частот спадало в 2 раза, то значение  $\epsilon''$  претерпевало более сильную частотную дисперсию, уменьшаясь в 35 раз. Наблюдаемое в экспериментах монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости с частотой свидетельствует о релаксационной дисперсии [14] в твердом растворе  $(TlInSe_2)_{0.1}(TlGaTe_2)_{0.9}$ .

На рис. 5 показана экспериментальная частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ . Из рис. 5 видно, что  $\text{tg } \delta$  гиперболически спадает с ростом частоты, что свидетельствует о потерях проводимости [14].

#### 4. Заключение

Проведенные измерения физических свойств монокристаллов твердого раствора  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  с тетрагональной структурой позволили определить диэлектрические характеристики и их частотную дисперсию, установить природу диэлектрических потерь, механизм переноса заряда на постоянном и переменном токе. Оценены плотность и энергетический разброс локализованных состояний, среднее время и длина прыжков, а также концентрация глубоких ловушек, ответственных за проводимость на постоянном и переменном токе  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ . Установлено, что на постоянном и переменном токе в твердом растворе  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  имеет место прыжковая проводимость по состояниям, локализованным вблизи уровня Ферми. Дисперсия диэлектрической проницаемости  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$  носит релаксационный характер. Гиперболический спад тангенса угла диэлектрических потерь с возрастанием частоты от 50 kHz до 35 MHz свидетельствует о потерях сквозной проводимости в  $(\text{TlInSe}_2)_{0.1}(\text{TlGaTe}_2)_{0.9}$ .

#### Список литературы

- [1] S.N. Mustafaeva, V.A. Ramazanzade, M.M. Asadov. *Mater. Chem. Phys.* **40**, 2, 142 (1995).
- [2] Э.М. Керимова, С.Н. Мустафаева, А.Б. Магеррамов. *Неорганические материалы*. **33**, 11, 1325 (1997).
- [3] С.Н. Мустафаева, Ш.Г. Гасымов, Э.М. Керимова, М.М. Асадов. *ФТТ* **54**, 1, 43 (2012).
- [4] S.N. Mustafaeva, Sh.G. Gasymov, E.M. Kerimova, M.M. Asadov. *J. Phys. Chem. Solids* **72**, 6, 657 (2011).
- [5] А.У. Шелег, В.Г. Гуртовой, С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимова. *ФТТ* **53**, 3, 443 (2011).
- [6] S.S. Abdinbekov, G.D. Guseinov. *Bull. Soc. Chim. France* **3**, 355 (1986).
- [7] А.У. Шелег, Е.М. Зуб, А.Я. Ячковский, С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимова. *Кристаллография* **57**, 2, 332 (2012).
- [8] А.У. Шелег, В.Г. Гуртовой, С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимова. *Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук* **1**, 106 (2012).
- [9] С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, А.И. Джаббаров, Э.М. Керимова. *Конденсированные среды и межфазные границы* **15**, 2, 150 (2013).
- [10] С.Н. Мустафаева. *ФТТ* **46**, 6, 979 (2004).
- [11] Н. Мотт, Е. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических материалах*. Мир, М. (1974). 472 с.
- [12] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников*. Наука, М. (1979). 351 с.
- [13] M. Pollak. *Phil. Mag.* **23**, 519 (1971).
- [14] В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. *Материалы электронной техники*. Высш. шк., М. (1986). 368 с.