

ВЛИЯНИЕ СЕРЕБРА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ TlInSe_2

© 2019 г. С. М. Асадов¹, С. Н. Мустафаева², *

¹Институт катализа и неорганической химии Национальной академии наук Азербайджана,
пр. Г. Джавида, 113, Баку, AZ 1143 Азербайджан

²Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,
пр. Г. Джавида, 131, Баку, AZ 1143 Азербайджан

*e-mail: solmust@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2018 г.

После доработки 28.02.2019 г.

Принята к публикации 16.04.2019 г.

Изучено влияние добавки серебра на диэлектрические свойства и *ac*-проводимость синтезированных из исходных высокочистых химических элементов и выращенных методом Бриджмена–Стокбаргера монокристаллов на основе TlInSe_2 (2 мол. % Ag). Экспериментальные результаты по изучению частотной дисперсии диэлектрических коэффициентов и проводимости монокристаллов $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ позволили установить природу диэлектрических потерь, прыжковый механизм переноса заряда и оценить параметры локализованных в запрещенной зоне состояний.

Ключевые слова: TlInSe_2 , твердый раствор $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$, монокристаллы, серебро, диэлектрические свойства, проводимость, параметры локализованных состояний

DOI: 10.1134/S0002337X19100014

ВВЕДЕНИЕ

Соединение TlInSe_2 перспективно для использования в электронной технике. Этот материал обладает полупроводниковыми свойствами, относительно высокой фото-, рентгено- и электронной проводимостью [1–3]. Эти свойства определяются слоисто-цепочечной структурой TlInSe_2 . Физические характеристики полупроводниковых соединений существенно зависят от типа и концентрации введенных легирующих добавок. Так, легирование монокристаллов TlInSe_2 различными металлами (Ag, Cu, Sn) [2], а также интеркалирование литием [1] позволяют повышать их фото- и рентгеночувствительность [1, 2]. Изучение диэлектрических свойств нелегированных монокристаллов TlInSe_2 на переменном токе [3] показало, что в диапазоне частот 5×10^4 – 3.5×10^7 Гц в них имеет место релаксационный характер дисперсии диэлектрической проницаемости. Экспериментально определено значение оптической диэлектрической проницаемости ($\epsilon'_{\text{опт}} = 17.9$) монокристалла TlInSe_2 . Рассчитаны значения частоты релаксации $f_p = 1.84 \times 10^4$ Гц и времени релаксации $\tau = 5.4 \times 10^{-5}$ с.

В [4] представлены результаты высокочастотных диэлектрических измерений твердых растворов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Er}_x\text{Se}_2$. Показано, что диэлектриче-

ские свойства $\text{TlIn}_{1-x}\text{Er}_x\text{Se}_2$ закономерно зависят от концентрации легирующей примеси Er ($x = 0, 0.001, 0.005$ и 0.01). При сохранении кристаллической структуры TlInSe_2 в твердых растворах на его основе обнаруживается улучшение функциональных характеристик решетки TlInSe_2 и закономерное влияние легирующей добавки Er на примесное состояние и перенос заряда.

Таким образом, физическими свойствами монокристаллов TlInSe_2 можно управлять, контролируя количество легирующей добавки. В материалах на основе TlInSe_2 взаимодействия ионов решетки TlInSe_2 с легирующими катионами, чувствительными к межатомным расстояниям и углам межатомных связей, влияют на зонную структуру и физические свойства.

Среди всех проводниковых материалов Ag обладает минимальным удельным сопротивлением при нормальной температуре. Сведения о действии серебра в полупроводниках скудны [5]. Серебро как примесь в полупроводниках имеет ряд преимуществ по сравнению с лантаноидами. Процесс легирования полупроводников лантаноидами вызывает технологические трудности, связанные с окислением этих металлов на воздухе.

В настоящей работе изучали влияние добавки серебра Ag на диэлектрические свойства и элект-

тропроводность полученных монокристаллов на основе TlInSe_2 . Выбор добавки серебра и его количества (2 мол. % Ag) связан с тем, что, хотя TlInSe_2 и имеет область гомогенности, возможная структурная неоднородность, связанная с большой концентрацией добавки (>2 мол. % Ag), может нарушить монотонность изменения физических свойств.

Цель исследования состояла в том, чтобы определить зависимость диэлектрических свойств от заданной концентрации добавки (2 мол. % Ag), высветить природу диэлектрических потерь в кристаллах $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ и установить механизм переноса заряда.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При выборе режимов синтеза TlInSe_2 , содержащего серебро, использовали сведения о фазовой диаграмме состояния $\text{Tl}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ [6]. В этой системе образуется промежуточная фаза состава TlInSe_2 . По данным дифференциального термического анализа (ДТА), фаза TlInSe_2 плавится конгруэнтно при 1025 К. Фаза TlInSe_2 имеет двустороннюю область гомогенности. При температуре 665 К область гомогенности соединения TlInSe_2 составляет ~5 мол. %.

Для получения TlInSe_2 и твердого раствора $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}\text{Ag}_x$ использовали метод прямого синтеза из элементов. Исходными компонентами служили особо чистые химические элементы: Tl-000, In-000, Se ОСЧ-16-4 и Ag Ср-99.999. Стехиометрический состав твердого раствора отвечал формуле $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$).

Поликристаллы TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) синтезировали из взятых в стехиометрических соотношениях элементов путем непосредственного их сплавления в вакуумированных до 10^{-3} Па кварцевых ампулах в течение 5–7 ч. При синтезе твердых растворов $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) сплавление компонентов проводили при температуре 1240 К, превышающей температуру плавления серебра (1233.8 К). Синтезированные образцы в ампулах отжигали при 750 К в течение 120 ч. Затем образцы охлаждали до комнатной температуры в режиме выключенной печи. Завершенность синтеза и гомогенность полученных образцов, а также их индивидуальность контролировали методами ДТА и рентгенофазового анализа (РФА). РФА образцов проводили на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения CuK_α при комнатной температуре.

Из синтезированных образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) методом Бриджмена–Стокбаргера выращивали монокристаллы [7, 8]. Для этого синтезированные образцы измельчали и помещали в кварцевые ампулы дли-

ной 8–10 см с заостренным концом и внутренним диаметром 1 см. Вакуумированные до давления 10^{-3} Па кварцевые ампулы с образцами помещали в двухтемпературную печь для выращивания монокристаллов. В верхней зоне печи поддерживалась температура 1030 ± 5 , а в нижней зоне – 953 ± 10 К. Скорость перемещения ампулы в печи составляла 0.3–0.5 см/ч, а градиент температуры у фронта кристаллизации – 25 ± 5 К. Указанный режим направленной кристаллизации оказался оптимальным для роста монокристаллов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$).

Диэлектрические коэффициенты монокристаллических образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) измеряли резонансным методом [9]. Диапазон частот переменного электрического поля составлял 5×10^4 – 3.5×10^7 Гц.

Образцы из TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) для электрических измерений готовили в виде плоских конденсаторов. В качестве электродов использовали серебряную пасту. Толщина монокристаллических образцов составляла 0.03–0.04 см. Все диэлектрические измерения проводили при 300 К. Воспроизводимость положения резонанса составляла по емкости ± 0.2 пФ, а по добротности ($Q = 1/\text{tg} \delta$) ± 1.0 – 1.5 деления шкалы. При этом наибольшие отклонения от средних значений составляли 3–4% для ϵ' и 7% для $\text{tg} \delta$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов РФА образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (рис. 1) показал, что они однофазные. Параметры решетки тетрагональной элементарной ячейки (пр. гр. $D_{4h}^{18}-I4/mcm$) TlInSe_2 имеют следующие значения: $a = 8.084 \pm 0.002$ Å, $c = 6.844 \pm 0.004$ Å. Эти параметры совпадают с данными [10] и близки к данным [11] ($a = 8.075$, $c = 6.847$ Å).

При растворении 2 мол. % Ag в TlInSe_2 сдвига основных пиков на рентгеновской дифрактограмме образца не наблюдается (рис. 1). На дифрактограммах помимо рефлексов фазы TlInSe_2 не наблюдается никаких других пиков, связанных с растворенным Ag. Это указывает на то, что при взаимодействии серебра с TlInSe_2 в кристаллическом состоянии образуются твердые растворы. Атомы серебра имеют близкие относительные электроотрицательности с замещаемыми катионами: Tl (1.8), In (1.78) и Ag (1.9 по шкале Полинга) [12], поэтому образуются твердые растворы замещения.

На рис. 2 приведены частотные зависимости действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ') образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$). Видно, что в TlInSe_2 (кривая 1) во всем изученном диапа-

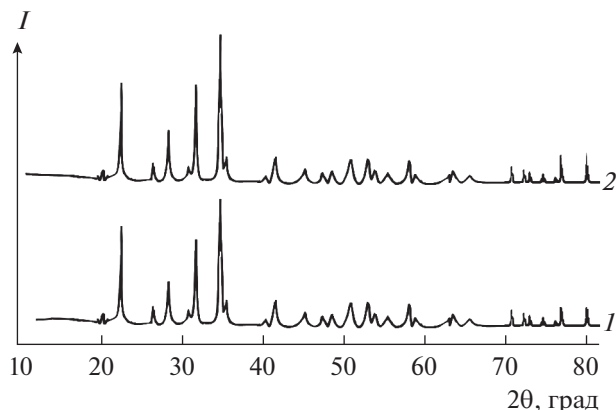


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы выращенных монокристаллов TlInSe_2 (1) и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (2).

зоне частот имеет место существенная дисперсия ϵ' (значение ϵ' по мере увеличения частоты от 5×10^4 до 3.5×10^7 Гц уменьшалось почти на порядок). В $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (кривая 2) с изменением частоты в этом же диапазоне значение ϵ' уменьшалось примерно в 3 раза, т.е. частотная дисперсия ϵ' после введения серебра в TlInSe_2 значительно уменьшалась. Наблюдаемое в экспериментах уменьшение диэлектрической проницаемости монокристалла $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) с ростом частоты свидетельствует о релаксационной дисперсии [13–15].

Образование твердых растворов $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) приводило к заметному уменьшению ϵ' при $f = 5 \times 10^4$ Гц (рис. 2). А при высоких частотах ($f \geq 10^5$ Гц) значения ϵ' для образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) не столь существенно отличались друг от друга. Частотные зависимости мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ'' монокристаллических образцов TlInSe_2 и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (рис. 3) также свидетельствуют о релаксационной дисперсии.

Значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) в монокристалле $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) были существенно меньше, чем в TlInSe_2 (рис. 4). Кроме того, если в TlInSe_2 зависимость $\text{tg}\delta(f)$ имела ярко выраженный максимум при 10^5 Гц, то в $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) максимум $\text{tg}\delta(f)$ наблюдался при 1.6×10^6 Гц. Характер зависимости $\text{tg}\delta(f)$ в изученных кристаллах свидетельствует о релаксационных потерях.

На рис. 5 представлены частотные зависимости ac -проводимости (σ_{ac}) монокристаллов TlInSe_2 (кривая 1) и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (кривая 2) при 300 К. Как видно из рис. 5, после введения серебра ac -проводимость образца TlInSe_2 су-

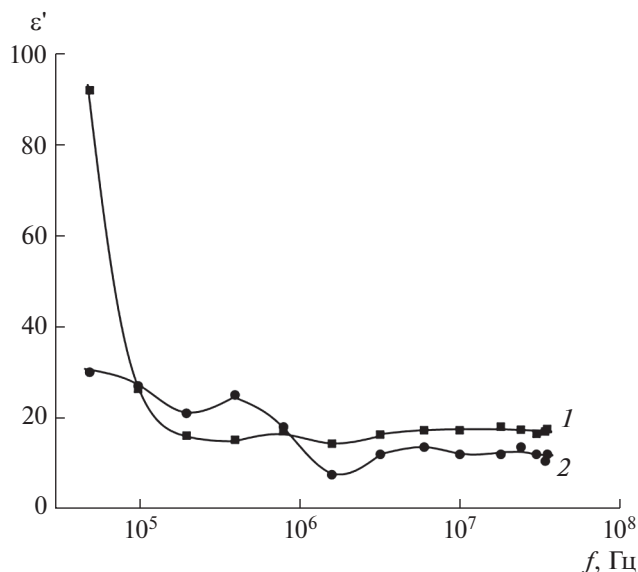


Рис. 2. Дисперсионные кривые $\epsilon'(f)$ для монокристаллов TlInSe_2 (1) и $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (2) при 300 К.

щественно уменьшалась (при $f = 5 \times 10^4$ Гц примерно в 50 раз). При увеличении частоты разница в значениях проводимости сокращалась и при $f = 3.5 \times 10^7$ Гц значения отличались в 2.5 раза. В частотной области $5 \times 10^4 - 2 \times 10^5$ Гц ac -проводимость монокристалла TlInSe_2 почти не изменялась, а затем имела место зависимость $\sigma_{ac} \sim f^{0.5}$. В отличие от TlInSe_2 ac -проводимость образца $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) в частотной обла-

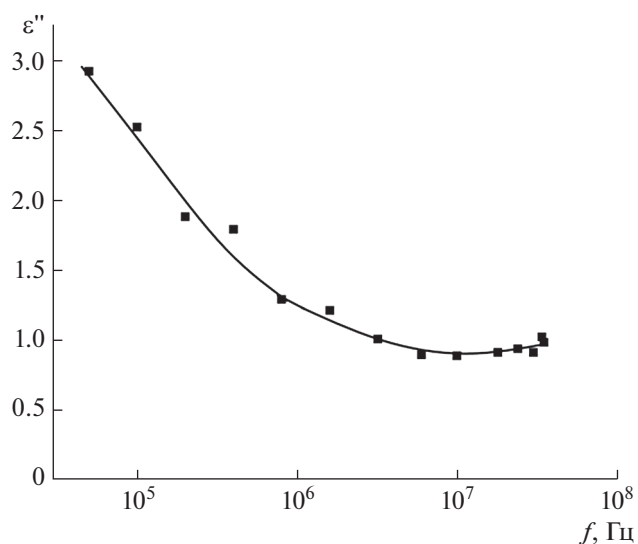


Рис. 3. Частотная зависимость мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$).

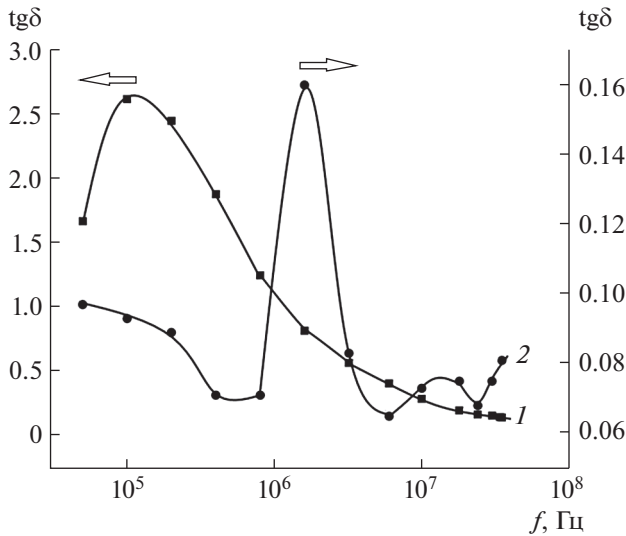


Рис. 4. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в монокристаллах TIInSe_2 (1) и $(1-x)(\text{TIInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (2) от частоты приложенного электрического поля.

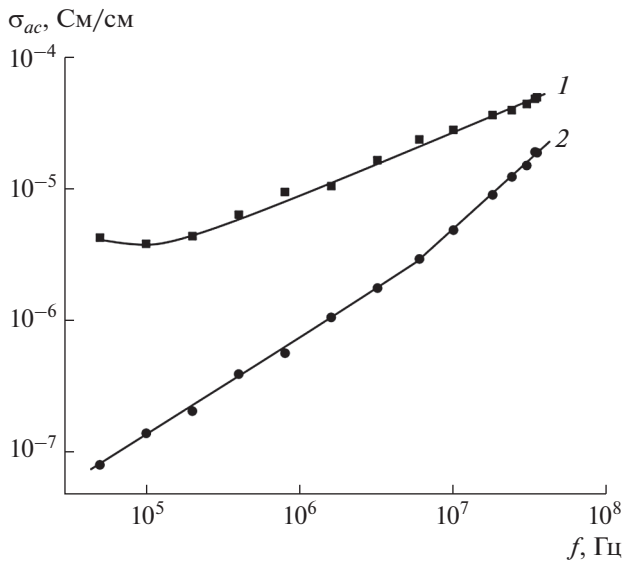


Рис. 5. Частотные зависимости проводимости монокристаллов TIInSe_2 (1) и $(1-x)(\text{TIInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) (2) при $T = 300$ К.

сти $5 \times 10^4 - 6 \times 10^6$ Гц изменялась по закону $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$, а при $f = 6 \times 10^6 - 3.5 \times 10^7$ Гц наблюдалась линейная зависимость: $\sigma_{ac} \sim f$.

Ас-проводимость зонного типа является в основном частотно-независимой вплоть до $10^{10} - 10^{11}$ Гц. Наблюдаемая нами экспериментальная зависимость $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ в монокристаллах на основе TIInSe_2 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 вблизи уровня Ферми [16]. 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. Предложенная в [17] формула для такой проводимости имеет вид:

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

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

Согласно формуле (1), ас-проводимость зависит от частоты как $f [\ln(v_{ph}/f)]^4$, т.е. при $f \ll v_{ph}$ σ_{ac} пропорциональна $f^{0.8}$. Экспериментальные возможности не позволили нам наблюдать прыжковую проводимость в монокристаллах TIInSe_2 , так как для этого требовались частоты, превышающие 3.5×10^7 Гц.

С помощью формулы (1) по экспериментально найденным значениям $\sigma_{ac}(f)$ образцов $(1-x)(\text{TIInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) вычислили плотность состояний на уровне Ферми: $N_F = 4.9 \times 10^{17}$ эВ $^{-1}$ см $^{-3}$. При вычислениях N_F для радиуса локализации и фононной частоты взяты значения: $a_l = 58$ Å по аналогии с InSe [18] и $v_{ph} = 10^{12}$ Гц.

Согласно теории прыжковой проводимости на переменном токе [16], среднее расстояние прыжков (R) определяется по формуле

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

В формуле (2) значение f соответствует средней частоте, при которой наблюдается $f^{0.8}$ – закон для проводимости. Вычисленное по формуле (2) значение R для монокристалла $(1-x)(\text{TIInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) составило 371 Å. Это значение в 6.4 раз превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда в изученных кристаллах. Значение R позволило по формуле

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

определить среднее время прыжков в образце монокристалла $(1-x)(\text{TIInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$): $\tau = 3.3 \times 10^{-7}$ с.

По формуле [16]

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

в $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) оценен энергетический разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний: $\Delta E = 0.02$ эВ. А по формуле

$$N_t = N_F \Delta E \quad (5)$$

определена концентрация глубоких ловушек в запрещенной зоне, ответственных за ac -проводимость в этих образцах: $N_t = 9.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выращенных монокристаллах $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0, 0.02$) изучена частотная дисперсия тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости и ac -проводимости (σ_{ac}) поперек цепей в области частот $f = 5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$ Гц. Введение серебра (2 мол. % Ag) в монокристалл TlInSe_2 привело к модифицированию дисперсионных кривых $\text{tg}\delta(f)$, $\epsilon'(f)$, $\epsilon''(f)$ и $\sigma_{ac}(f)$. Во всей изученной области частот в образце имели место релаксационные потери. В области частот $5 \times 10^4 - 6 \times 10^6$ Гц ac -проводимость образца $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$) подчинялась закономерности $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$, характерной для прыжкового механизма переноса заряда по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Нами оценены плотность ($N_F = 4.9 \times 10^{17} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$) и энергетический разброс ($\Delta E = 0.02$ эВ) состояний, лежащих в окрестности уровня Ферми, среднее расстояние ($R = 371 \text{ \AA}$) и время ($\tau = 3.3 \times 10^{-7} \text{ с}$) прыжков, а также концентрация глубоких ловушек ($N_t = 9.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Таким образом, установлено, что за счет введения в матрицу монокристалла TlInSe_2 серебра можно варьировать диэлектрические коэффициенты и ac -проводимость монокристалла $(1-x)(\text{TlInSe}_2) \cdot x\text{Ag}$ ($x = 0.02$).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при президенте Азербайджанской Республики (грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/05/1-M-13 и грант № EIF-BGM-4-RFTF-1/2017-21/05/1-M-07).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mustafaeva S.N., Ramazanade V.A., Asadov M.M.* Influence of Intercalation on Electrical and Photoelectrical Properties of Ternary Chain and Layer Semiconductors // Mater. Chem. Phys. 1995. V. 40. № 2. P. 142–145.

2. *Мустафаева С.Н., Керимова Э.М., Магеррамов А.Б.* Влияние примесей Ag, Cu, Sn на электрические и фотоэлектрические свойства монокристаллов TlInSe_2 // Неорган. материалы. 1997. Т. 33. № 11. С. 1325–1326.
3. *Мустафаева С.Н.* Частотная зависимость действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости монокристалла TlInSe_2 при релаксационных процессах // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 7. С. 1–8.
4. *Mustafaeva S.N., Kerimova E.M., Gasanov A.I.* Synthesis, Roentgenophase Analysis and Physical Properties of $\text{TlIn}_{1-x}\text{Er}_x\text{Se}_2$ Solid Solutions // Acta Physica Polonica A. 2015. V. 128. № 4. P. 697–699.
5. *Шаров М.К.* Электрофизические свойства твердых растворов серебра в PbTe // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 5. С. 613–615.
6. *Mucha I.* Phase Diagram for the Quasi-Binary Thallium(I) Selenide–Indium(III) Selenide System // Thermochim. Acta. 2012. V. 550. P. 1–4.
7. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Джаббаров А.И., Керимова Э.М.* Проводимость и термо-э. д. с. кристаллов $(\text{TlInSe}_2)_{0.2}(\text{TlGaTe}_2)_{0.8}$ // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 3. С. 267–271.
8. *Мустафаева С.Н., Асадов С.М., Керимова Э.М.* Диэлектрические свойства и электропроводность легированного серебром монокристалла TlGaS_2 // ФТП. 2018. Т. 52. Вып. 2. С. 167–170.
9. *Мустафаева С.Н.* Методика измерения проводимости высокоомных материалов на переменном токе // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 10. С. 74–79.
10. *Шелег А.У., Зуб Е.М., Ячковский А.Я., Мустафаева С.Н., Керимова Э.М.* Рентгенографические исследования кристаллов системы $(\text{TlInSe}_2)_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$ // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 332–334.
11. *Muller D., Eulenberger G., Hahn H.* Über ternere. Thallium chalkogenide mit Thallium-selenid-struktur // Z. Anorg. Allg. Chem. 1973. V. 398. № 2. P. 207–220.
12. *Хьюи Дж.* Неорганическая химия. Строение вещества и реакционная способность: пер. с англ. / Под ред. Степина Б.Д., Лидина Р.А. М.: Химия, 1987. 696 с.
13. *Пасынков В.В., Сорокин В.С.* Материалы электронной техники. 6-е изд. СПб.-М.-Краснодар: Лань, 2004. 368 с.
14. *Асадов С.М., Мустафаева С.Н.* Диэлектрические потери и перенос заряда в легированном сурьмой монокристалле TlGaS_2 // ФТП. 2018. Т. 60. Вып. 3. С. 495–498.
15. *Мустафаева С.Н., Асадов С.М., Керимова Э.М.* Диэлектрические свойства и проводимость монокристаллов $\text{TlGaSe}_2:\text{Tm}$ // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 7. С. 662–667.
16. *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах: пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. В 2 томах. М.: Мир, 1982. Т. 1. 368 с. Т. 2. 664 с.
17. *Pollak M.* Frequency Dependence of Conductivity in Amorphous Solids // Phil. Mag. 1971. V. 23. P. 519–542.
18. *Мустафаева С.Н., Асадов М.М., Исмаилов А.А.* Перенос заряда по локализованным состояниям в монокристаллах InSe и $\text{InSe}(\text{Sn})$ // Физика низких температур. 2010. Т. 36. № 4. С. 394–397.