

## ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$

С.Н. МУСТАФАЕВА

*Институт Физики им. академика Г.М. Абдуллаева*

*Национальной Академии Наук Азербайджана*

*Az-1143, Баку, пр.Г.Джавида, 33*

*E-mail: solmust@gmail.com*

Лaylı  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  ( $x = 0; 0,005; 0,02$ ) monokristallarda dielektrik xarakteristikaların tezlikdən asılılıqları və  $f = 5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$  Hz tezlik diapazonunda laylara perpendikulyar istiqamətdə ac-keçiriciliyi ( $\sigma_{ac}$ ) tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki,  $5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^7$  Hz tezlik sahəsində  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  kristallarda yükün köçürülməsi, Fermi səviyyəsi yaxınlığında lokalizə olunmuş hallar üzrə, sıçrayış mexanizmi ilə baş verir. Bu səviyyələrin sıxlığı ( $N_F$ ), sıçrayışların orta vaxtı ( $\tau$ ) və sıçrayışların məsafəsi ( $R$ ) qiymətləndirilmişdir.  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  monokristalların tərkibinin onların dielektrik əmsallarına təsiri təyin edilmişdir.

В слоистых монокристаллах  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  ( $x = 0; 0,005; 0,02$ ) изучены частотные зависимости диэлектрических характеристик и ac-проводимости ( $\sigma_{ac}$ ) поперек слоёв в частотном диапазоне  $f = 5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$  Гц. Обнаружено, что в частотной области  $5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^7$  Гц в кристаллах  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  имеет место прыжковый механизм переноса заряда по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Оценены: плотность ( $N_F$ ) этих состояний, среднее время ( $\tau$ ) и расстояние ( $R$ ) прыжков. Изучено влияние состава монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  на их диэлектрические коэффициенты. Установлено, что с ростом содержания кобальта  $N_F$  возрастает, а  $\tau$  и  $R$  уменьшаются.

Frequency dependence of the dissipation factor  $\tan\delta$ , the permittivity  $\epsilon$ , and the ac conductivity  $\sigma_{ac}$  across the layers in the frequency range  $f = 5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$  Hz were studied in layered  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  ( $x=0; 0,005; 0,02$ ) single crystals. It was established that the mechanism of ac charge transport across the layers in  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  single crystals in the frequency range from  $5 \cdot 10^4$  to  $3 \cdot 10^7$  Hz is hopping over localized states near the Fermi level. The Fermi level density of states ( $N_F$ ), the mean hop distance ( $R$ ) and time ( $\tau$ ) has been estimated.

Поиск новых материалов на основе тройных полупроводников типа  $\text{TlA}^{\text{III}}\text{X}_2^{\text{VI}}$  ( $A = \text{In, Ga; X} = \text{S, Se, Te}$ ) остается актуальной и практически значимой задачей. Эти кристаллы и твердые растворы на их основе перспективны для применения в нелинейной оптике, лазерной технике, в направлении создания приемников для видимой и ИК-областей спектра, рентгендетекторов и других преобразователей.

Исходные тройные соединения  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaS}_2$  были синтезированы из элементов Tl, Ga, In, S, Se чистоты не менее 99,99%. Для синтеза системы  $\text{TlInSe}_2 - \text{TlGaS}_2$  данные тройные соединения служили исходными материалами, которые были взяты в стехиометрических соотношениях и помещены в откачанные до давления  $10^{-3}$  Па и запаянные графитизированные кварцевые ампулы. Режим синтеза сплава выбирался на основе температур плавления исходных материалов. Ампулы с веществом нагревались до температуры на  $30 - 40^\circ\text{C}$  выше указанных температур и выдерживались при этой температуре 5–6 часов, затем температуру в печи медленно понижали до значения приблизительно  $2/3 T_{\text{плав}}$  и отжигали образцы в течение 250 ч. Затем методом Бриджмена выращивались монокристаллы твердых растворов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$ .

Представляло интерес изучение диэлектрических свойств указанных материалов и влияния состава твердых растворов на эти свойства.

Измерения диэлектрических свойств (тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ ) монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  ( $x=0; 0,005; 0,02$ ) на переменном токе произведены резонансным методом с помощью куметра TESLA BM 560. Диапазон частот переменного электрического поля составлял  $5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$  Гц.

Монокристаллические образцы из  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  для электрических измерений были изготовлены в виде плоских конденсаторов, плоскость которых была перпендикулярна кристаллографической C-оси кристаллов. В качестве электродного материала использована серебряная паста. Толщина образцов из  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  составляла  $100 - 150$  мкм, а площадь обкладок  $\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ . Все диэлектрические измерения монокристаллических образцов были проведены при 300К. 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  $\text{tg}\delta$ .

В области частот  $5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^7$  Гц измерена электрическая емкость образцов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$ . По значениям емкости образцов при различных частотах рассчитаны значения диэлектрической проницаемости (рис. 1). Если в  $\text{TlGaS}_2$  в указанном диапазоне частот значения  $\epsilon$  изменялись от 26 до 30, то в  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  значения  $\epsilon$  варьировались от 2 до 10, т.е. в них диэлектрическая проницаемость существенно уменьшалась по сравнению с  $\epsilon$  для  $\text{TlGaS}_2$ . Кроме того, в  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  наблюдалась более значительная диэлектрическая дисперсия. На рис. 2 показаны частотные зависимости коэффициента диэлектрических потерь ( $\epsilon''$ ) изученных монокристаллов.

Изучены также частотные зависимости ac-проводимости монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  при 300К (рис. 3). Ac-проводимость  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  существенно превышала ac-проводимость  $\text{TlGaS}_2$  (более чем на один порядок), так при  $f = 5 \cdot 10^4$  Гц  $\sigma_{ac}$  для  $\text{TlGaS}_2$  составляла  $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ; для  $x = 0,005$   $\sigma_{ac} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , при  $x = 0,02$   $\sigma_{ac} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [1, 2].

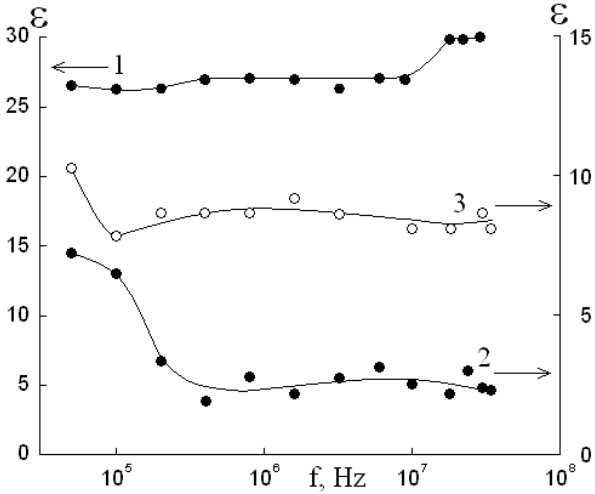


Рис. 1. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости монокристаллов: 1 –  $\text{TlGaS}_2$ ; 2 –  $(\text{TlGaS}_2)_{0,995}(\text{TlInSe}_2)_{0,005}$ ; 3 –  $(\text{TlGaS}_2)_{0,98}(\text{TlInSe}_2)_{0,02}$ .

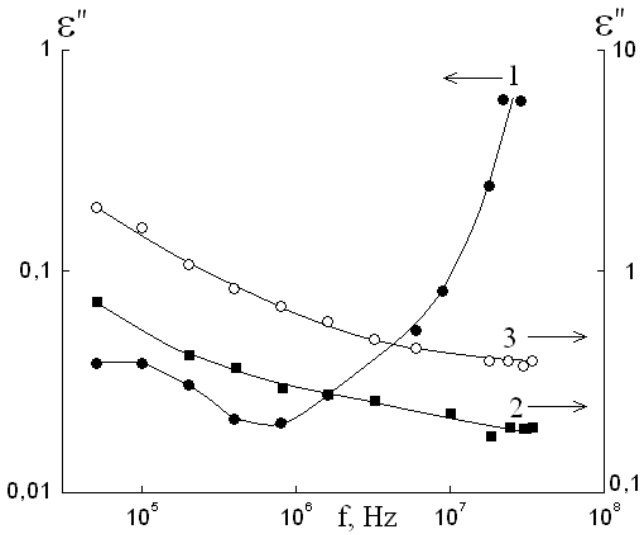


Рис. 2. Частотная дисперсия  $\epsilon''$  монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  при различных  $x$ : 1 – 0; 2 – 0.005; 3 – 0.02.

В области частот  $f=5 \cdot 10^4 - 3,0 \cdot 10^7 \text{ Гц}$  в монокристаллах  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  ас-проводимость изменялась по

закону  $\sigma_{ac} \sim f^{0,8}$ , а при дальнейшем увеличении частоты зависимость  $\sigma_{ac}$  от  $f$  становилась суперлинейной.

Наблюдение участка  $\sigma_{ac} \sim f^{0,8}$  на кривых  $\sigma_{ac}(f)$  свидетельствует о том, что в указанном диапазоне частот проводимость монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  обусловлена прыжками носителей заряда между локализованными вблизи уровня Ферми состояниями.

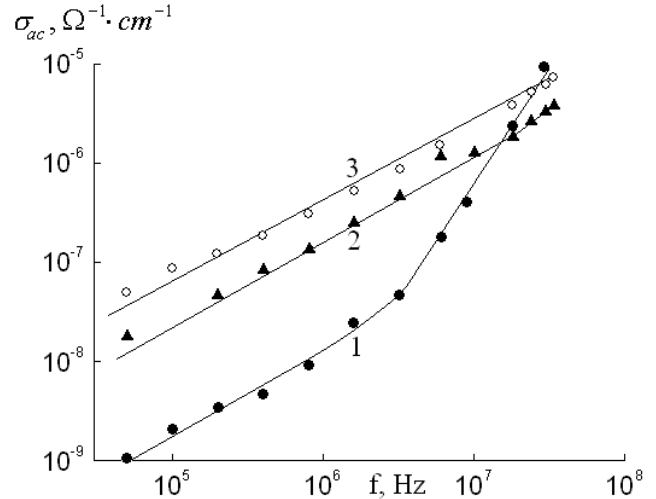


Рис. 3. Частотные зависимости ас-проводимости монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  при 300К: 1 – 0; 2 – 0.005; 3 – 0.02.

По экспериментально найденным значениям  $\sigma_{ac}(f)$  вычислили плотность состояний на уровне Ферми ( $N_F$ ). Теория прыжковой проводимости на переменном токе [3] позволила также оценить среднее время ( $\tau$ ) и расстояние ( $R$ ) прыжков. Определена концентрация глубоких ловушек ( $N_t$ ), ответственных за ас-проводимость в изученных монокристаллах. Все перечисленные параметры монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$ , определенные из диэлектрических измерений на переменном токе, сведены в таблице.

Из таблицы и рис. 4 видно, что с ростом содержания  $\text{TlInSe}_2$  в кристаллах  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$   $N_F$  возрастает, а  $\tau$  и  $R$  уменьшаются.

Таблица.

Параметры локализованных состояний в монокристаллах $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$				
Состав кристалла	$N_F, \text{эВ}^{-1}, \text{см}^{-3}$	$\tau, \text{с}$	$R, \text{Å}$	$N_t, \text{см}^{-3}$
$\text{TlGaS}_2$	$2,1 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-6}$	103	$4,2 \cdot 10^{17}$
$(\text{TlGaS}_2)_{0,995}(\text{TlInSe}_2)_{0,005}$	$8,5 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	83	$8,3 \cdot 10^{17}$
$(\text{TlGaS}_2)_{0,98}(\text{TlInSe}_2)_{0,02}$	$1,3 \cdot 10^{19}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	78	$10^{18}$

На рис.4 приведены зависимости  $N_F, \tau, R$  и  $N_t$  монокристаллов твердых растворов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  от состава.

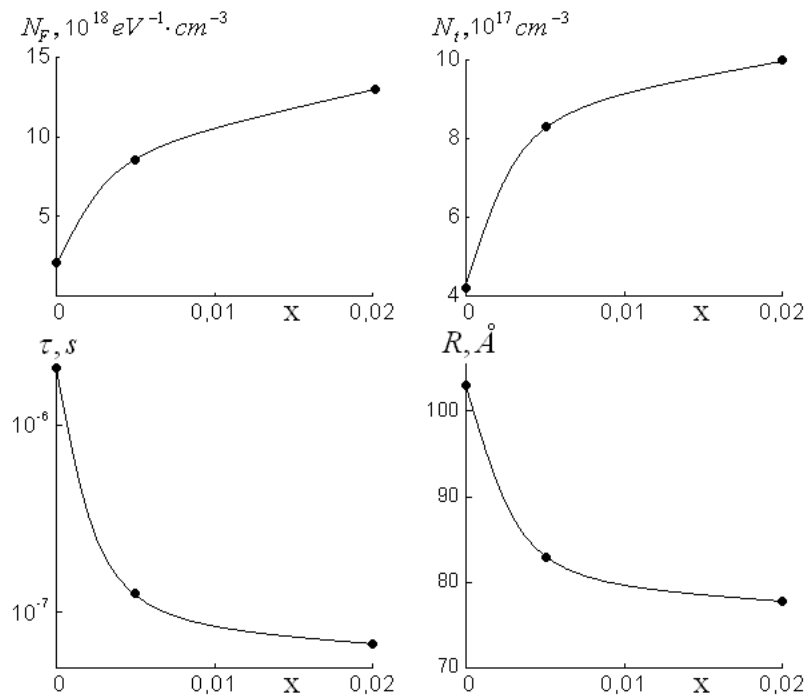


Рис. 4. Зависимости  $N_F$ ,  $\tau$ ,  $R$  и  $N_t$  монокристаллов  $(\text{TlGaS}_2)_{1-x}(\text{TlInSe}_2)_x$  от состава.

- [1]. С.Н. Мустафаева, В.А. Алиев, М.М. Асадов. ФТТ 40, 4, 612 (1998). [3]. Н.Мотт, Э.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах. Мир, М.1974,472с.
- [2]. С.Н. Мустафаева. ФТТ 46, 6, 979 (2004).