

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ И МНИМОЙ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА TlInSe₂ ПРИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

С. Н. Мустафаева

Институт Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Получена 1 мая 2013 г.

Аннотация. Диэлектрические измерения монокристалла TlInSe₂ в диапазоне частот $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$ Гц позволили установить релаксационный характер дисперсии диэлектрической проницаемости, а также природу диэлектрических потерь в монокристалле. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) в TlInSe₂ обусловлена не только релаксационной поляризацией, но и сквозной проводимостью. По мере роста потерь сквозной проводимости релаксационные потери играют всё меньшую роль. Экспериментально определено значение оптической диэлектрической проницаемости ($\epsilon'_{\text{опт}} = 17.9$) монокристалла TlInSe₂. Рассчитаны значения статической диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{\text{ст}} = 526.6$ и инкремента диэлектрической проницаемости $\Delta \epsilon' = 508.7$, а также частоты релаксации $f_p = 1.84 \times 10^4$ Гц и времени релаксации $\tau = 5.4 \times 10^{-5}$ с.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; частота; диэлектрические потери; проводимость; релаксационная поляризация; монокристалл TlInSe₂.

Abstract. Dielectric measurements of TlInSe₂ single crystal in frequency range $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$ Hz allowed to establish relaxation character of dispersion of dielectric permittivity and nature of dielectric losses. The experimental frequency dependence of the dissipation factor $\tan \delta$ for TlInSe₂ single crystal has maximum at $f = 10^5$ Hz and at $f > 10^5$ Hz is characterized with a monotonic descending. The hyperbolic decrease of $\tan \delta$ with frequency is evidence of the fact, that conductivity loss becomes the main dielectric loss mechanism in the TlInSe₂ single crystal at studied frequency range. Maximum on the $\tan \delta (f)$ – curve points to relaxation losses in TlInSe₂. The value of optic dielectric permittivity of TlInSe₂ single crystal

($\epsilon'_{\text{opt}} = 17.9$) has been determined from high-frequency dielectric measurements. The static dielectric permittivity ($\epsilon'_{\text{st}} = 526.6$), the relaxation frequency ($f_r = 1.84 \times 10^4$ Hz) and relaxation time ($\tau = 5.4 \times 10^{-5}$ s) have been estimated for TlInSe₂ single crystal.

Keywords: dielectric permittivity; frequency; dielectric losses; conductivity; relaxation polarization; TlInSe₂ single crystal.

Введение

Монокристаллы TlInSe₂ относятся к классу слоисто-цепочечных полупроводников типа A^{III}B^{III}C^{VI}₂. Характерной особенностью кристаллов TlInSe₂ является то, что в них вандерваальсовы «щели» образуются по двум взаимно перпендикулярным плоскостям, а это благоприятствует реализации интеркаляции по ним инородных частиц (ионов, атомов молекул). Электрические, фотоэлектрические и рентгенодозиметрические свойства этих кристаллов, как чистых, так и интеркалированных ионами лития, а также легированных примесями Ag, Cu и Sn изучены в [1–3]. Было показано, что монокристаллы TlInSe₂ характеризуются высокой чувствительностью к электромагнитному излучению как ближней ИК, так и рентгеновской области спектра. Это представляет определенный практический интерес в плане использования указанных кристаллов в качестве активных элементов фоторезисторов и рентгендетекторов.

Перечисленные свойства монокристаллов TlInSe₂ были изучены в постоянных электрических полях.

Цель настоящей работы – изучение диэлектрических свойств монокристаллов TlInSe₂ в переменных электрических полях, определение основных диэлектрических коэффициентов и установление природы диэлектрических потерь.

Методика эксперимента

TlInSe₂ синтезировали в откачанной до остаточного давления 10^{-2} – 10^{-3} Па кварцевой ампуле. В качестве исходных компонентов использовали элементы

Tl, In, Se высокой степени чистоты. Синтез проводили при температуре 1086 К в течение 4–6 ч [3]. Монокристаллы TlInSe₂ были выращены методом Бриджмена со скоростью 0.5–0.8 мм/ч. Охлаждение кристаллов до комнатной температуры проводили со скоростью 5–10 К/мин. По данным рентгеновского анализа TlInSe₂ кристаллизуется в тетрагональной сингонии типа TlSe, пр.гр. *I4/mcm*; $z = 4$; параметры решетки $a = 8.04$, $c = 6.84$ Å.

Диэлектрические коэффициенты монокристаллов TlInSe₂ измерены резонансным методом с помощью куметра TESLA BM 560. Диапазон частот переменного электрического поля составлял 5×10^4 – 3.5×10^7 Гц.

Образцы из TlInSe₂ для электрических измерений были изготовлены в виде плоских конденсаторов. В качестве электродов использована серебряная паста. Толщина монокристаллического образца из TlInSe₂ составляла 300 мкм, а площадь обкладок – 7.2×10^{-2} см². Удельная темновая проводимость исследуемых кристаллов, измеренная на постоянном токе, составляла $\sigma_{dc} = 8.3 \times 10^{-6}$ Ом⁻¹·см⁻¹ при 300 К.

Все диэлектрические измерения проведены 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 их обсуждение

Диэлектрические свойства твердых тел на переменном токе удобно рассматривать, пользуясь понятием комплексной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

где ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

На рис. 1 (кривая 1, сплошная) приведена частотная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла TlInSe₂. Видно, что с ростом частоты от 5×10^4 до 3.5×10^7 Гц

ε' уменьшается на порядок (от 179 до 17.9), причем при сравнительно низких частотах наблюдается резкий спад ε' , а при $f > 4 \times 10^5$ Гц ε' слабо зависит от f . Наименьшее значение $\varepsilon' = 17.9$, измеренное на высокой частоте (3.5×10^7 Гц) можно считать оптической диэлектрической проницаемостью ε'_{opt} монокристалла TlInSe_2 . Характер изменения ε' с частотой свидетельствует о релаксационной дисперсии диэлектрической проницаемости в монокристалле TlInSe_2 .

На рис. 2 представлена частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) в монокристалле TlInSe_2 . При $f = 10^5$ Гц кривая $\text{tg}\delta(f)$ проходит через максимум, а затем носит спадающий характер. Форма экспериментальной кривой $\text{tg}\delta(f)$ в TlInSe_2 (рис. 2) характерна для частотного изменения диэлектрических потерь с учетом вкладов релаксационного механизма и электропроводности кристалла [4].

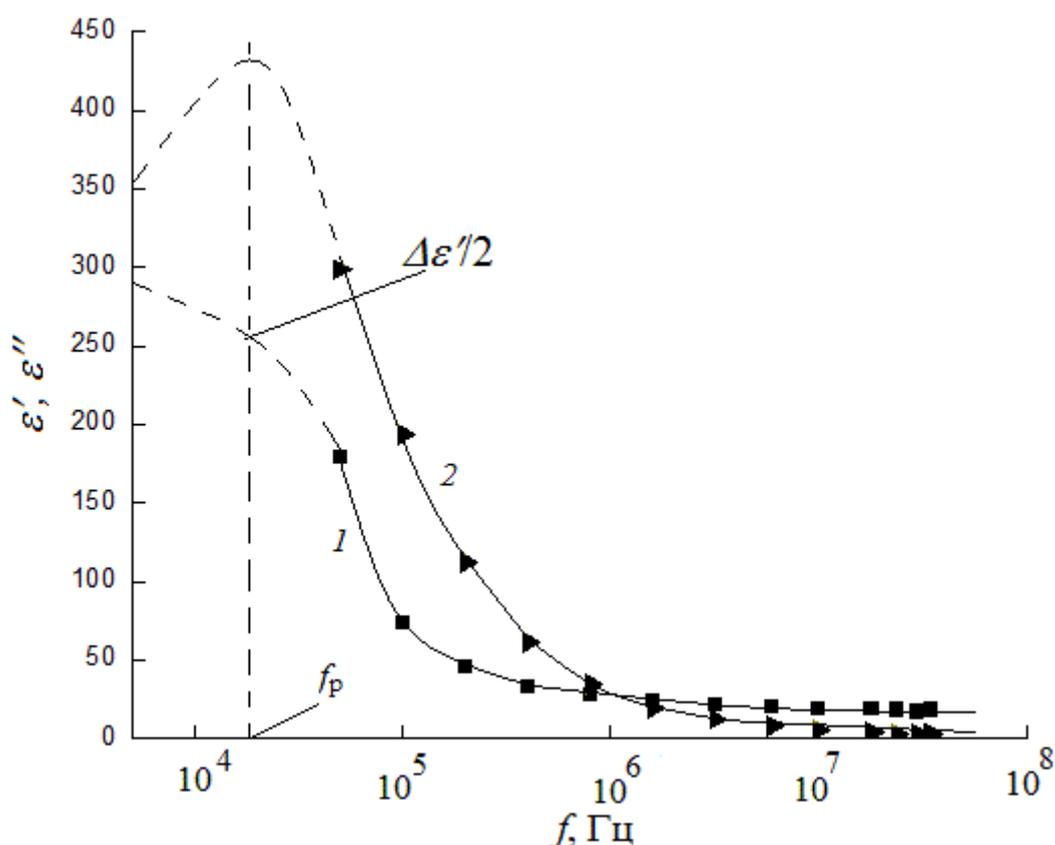


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (1) и мнимой (2) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла TlInSe_2 .

Наблюдение максимума на кривой $\text{tg}\delta(f)$ свидетельствует о релаксационных потерях в TlInSe_2 . Наличие одного максимума на кривой $\text{tg}\delta(f)$ говорит о том, что монокристалл TlInSe_2 имеет одно время релаксации.

При релаксационных процессах на частоте $f = f_t$ [5]

$$\text{tg}\delta_{\max} = \frac{\varepsilon'_{cm} - \varepsilon'_{onm}}{2\sqrt{\varepsilon'_{cm} \cdot \varepsilon'_{onm}}} \quad (2)$$

Зная экспериментальные значения $\text{tg}\delta_{\max}$ и ε'_{onm} из соотношения (2) можно рассчитать статическую диэлектрическую проницаемость монокристалла TlInSe_2 (наибольшее возможное значение ε' кристалла при инфранизкой частоте или на постоянном напряжении).

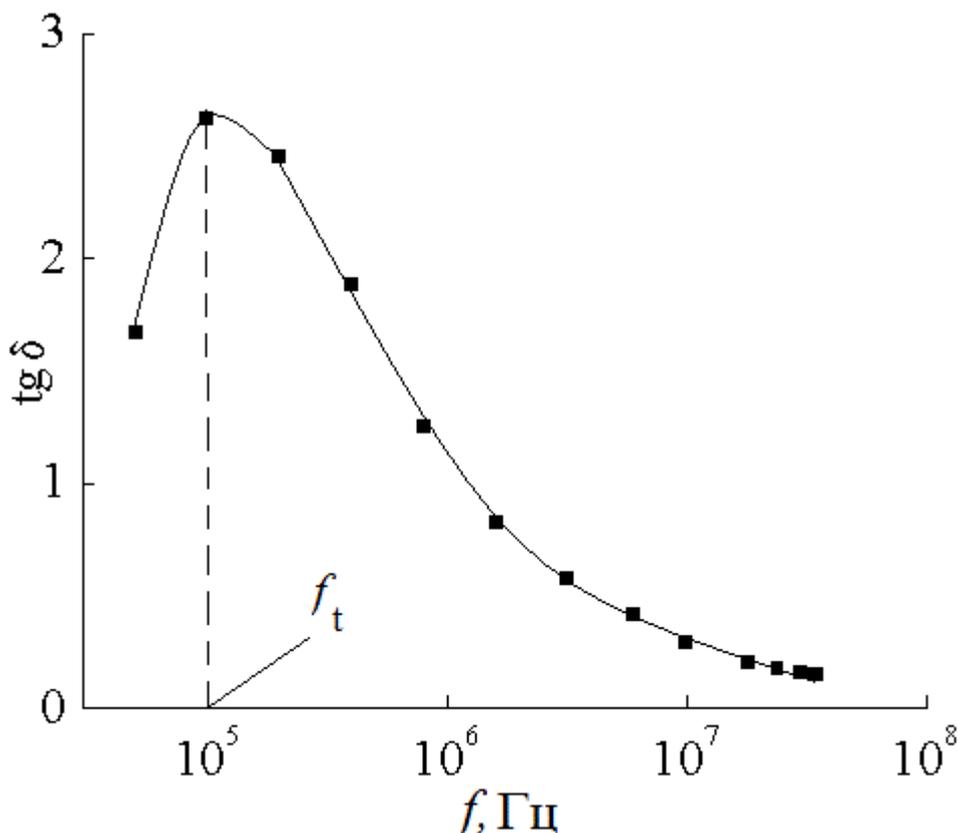


Рис. 2. Частотная дисперсия тангенса угла диэлектрических потерь в монокристалле TlInSe_2 .

Для ε'_{cm} было получено значение 526.6. Инкремент диэлектрической проницаемости ($\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_{cm} - \varepsilon'_{onm}$) монокристалла TlInSe₂ составил 508.7.

Экспериментально полученное значение $f_t = 10^5$ Гц, при котором $\text{tg}\delta$ проходит через максимум, позволило из соотношения [5]

$$f_t = f_p \sqrt{\frac{\varepsilon'_{cm}}{\varepsilon'_{onm}}} \quad (3)$$

определить частоту релаксации (f_p), значение которой составило 1.84×10^4 Гц. При этом время релаксации в монокристалле TlInSe₂ составило $\tau = 5.4 \times 10^{-5}$ с. Согласно теории при частоте $f = f_p$ диэлектрическая проницаемость ε' принимает значение, равное $\Delta\varepsilon'/2$. На рис. 1 пунктиром обозначена расчетная частотная зависимость $\varepsilon'(f)$ (кривая 1), продолженная в область низких частот, которая дополняет экспериментально полученную зависимость $\varepsilon'(f)$ (сплошная кривая 1 на рис. 1).

На рис. 1 показана также частотная дисперсия мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости ε'' TlInSe₂ (кривая 2). Если в частотном диапазоне $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$ Гц с ростом частоты значение ε' уменьшалось на порядок, то значение ε'' в этой области частот уменьшалось более чем на два порядка (от 298.5 до 2.6). Т.е. имела место сильная дисперсия ε'' (особенно при относительно низких частотах). При релаксационной поляризации ε'' при частоте $f = f_p$ должна проходить через максимум (обычно $f_p < f_t$). На рис. 1 (кривая 2) пунктиром показана расчетная зависимость $\varepsilon''(f)$, дополняющая полученную экспериментальную зависимость при низких частотах.

На рис. 3 показана частотная зависимость σ_{ac} – проводимости в монокристалле TlInSe₂ при $T = 300$ К. При $f = 5 \times 10^4$ Гц значение σ_{ac} монокристалла TlInSe₂ составляло 8.3×10^{-6} Ом⁻¹·см⁻¹ и было равно удельной темновой проводимости этого кристалла на постоянном токе. Т.е. частотная зависимость σ_{ac} начинала проявляться при частотах $f > 5 \times 10^4$ Гц. По мере роста частоты от 5×10^4 до 3.5×10^7 Гц σ_{ac} возрастала примерно в 6 раз.

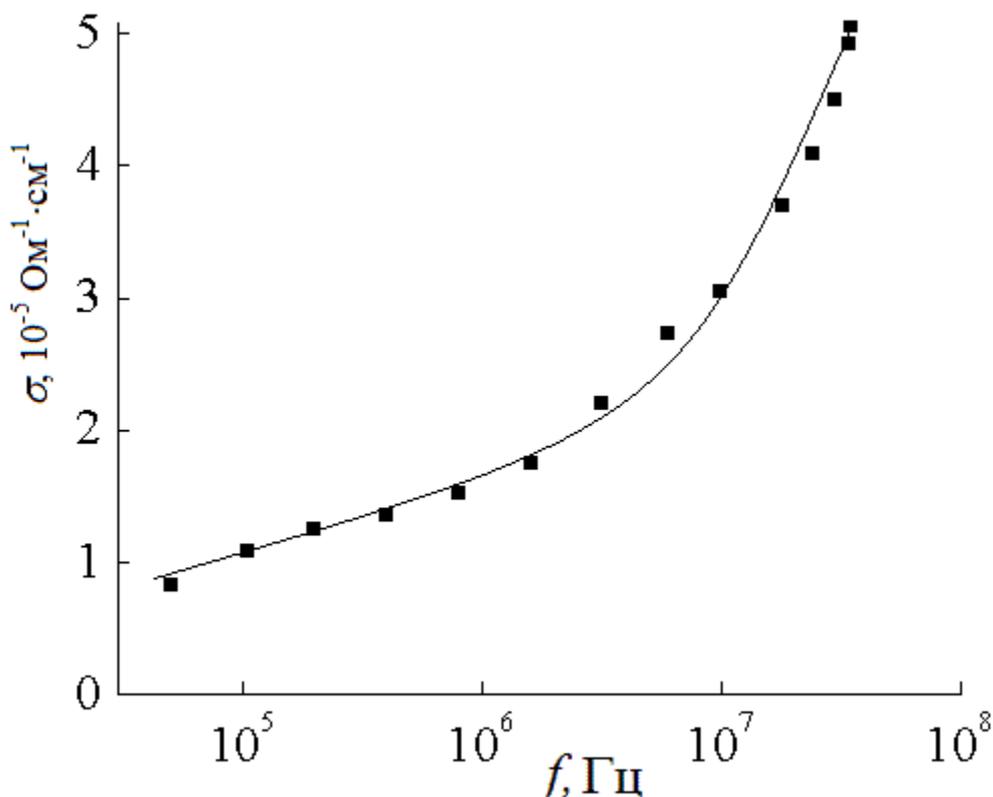


Рис. 3. Ас-проводимость монокристалла TlInSe₂ при T = 300 К.

Заключение

Таким образом, показано, что диэлектрические коэффициенты и проводимость монокристалла TlInSe₂ обнаруживают сильную дисперсию в радиочастотном диапазоне. Установлены релаксационный характер частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и природа диэлектрических потерь в монокристалле TlInSe₂.

Литература

1. Мустафаева С.Н. Эффекты электрической памяти и другие свойства интеркалированных литием полупроводников A^{III}B^{III}C₂^{VI} // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. №8. С.1033–1036.
2. Mustafaeva S.N., Ramazanzade V.A., Asadov M.M. Influence of Intercalation on Electrical and Photoelectrical Properties of Ternary Chain and Layer Semiconductors // Materials Chemistry and Physics. 1995. V.40. №2. P.142–145.

3. Керимова Э.М., Мустафаева С.Н., Магеррамов А.Б. Влияние примесей Ag, Cu, Sn на электрические и фотоэлектрические свойства монокристаллов TlInSe_2 // Неорганические материалы. РАН. 1997. Т. 33. № 11. С. 1325–1326.
4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая шк. 1986. 368 с.
5. Физика диэлектриков. Тр. 2-ой Всесоюз. конф. / Под ред. Г.И. Сканава. М.: Из-во АН СССР (1960). 532 с.