

03,11

## Влияние ионизирующего излучения на диэлектрические характеристики монокристаллов $\text{TlInSe}_2$ и $\text{TlGaTe}_2$

© А.У. Шелег<sup>1</sup>, В.Г. Гуртовой<sup>1</sup>, С.Н. Мустафаева<sup>2</sup>, Э.М. Керимова<sup>2</sup><sup>1</sup> Научно-практический центр по материаловедению НАН Белоруссии, Минск, Белоруссия<sup>2</sup> Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

E-mail: sheleg@physics.by

(Поступила в Редакцию 30 июня 2010 г.)

В окончательной редакции 17 августа 2010 г.)

Приведены результаты исследования температурной зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости кристаллов соединений  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$ , необлученных и облученных электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Установлено, что облучение электронами приводит к уменьшению значений удельной электропроводности  $\sigma$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  во всей исследованной области температур (90–320 K). Обнаружено, что в монокристаллах  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  имеет место характерная для этого типа кристаллов последовательность фазовых переходов, проявляющаяся на температурных зависимостях  $\sigma = f(T)$  и  $\epsilon = f(T)$  в виде аномалий. Облучение кристаллов электронами дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  не влияет на температуры фазовых переходов исследованных кристаллов.

### 1. Введение

Трехкомпонентные полупроводниковые соединения типа  $\text{TB}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$  ( $B = \text{In, Ga}$ ;  $C = \text{S, Se, Te}$ ) представляют собой квазидвумерные системы с ярко выраженной слоистой структурой. В них тетраэдры  $\text{BC}_4$  образуют цепочки, вытянутые перпендикулярно оси  $c$ . Одновалентные ионы таллия связаны с цепочками тетраэдров ионными силами связи. Поэтому структуру этого соединения можно представить как состоящую из двух подсистем: жесткой подсистемы в виде отрицательно заряженных цепочек  $\dots(\text{BC}_2)^-\dots$ , параллельных плоскости (001), и более подвижной системы ионов таллия. Поскольку взаимодействие между слоями осуществляется слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, слоевые пакеты могут легко сдвигаться друг относительно друга [1]. Поэтому  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$ , как и другие кристаллы этой группы, обладают политипизмом, который существенным образом может влиять на их физические свойства. Кроме того, у некоторых представителей этого семейства обнаружены последовательности фазовых переходов (ФП), обусловленные наличием в них длиннопериодических соизмеримых и несоизмеримых сверхструктур и их преобразованиями при изменении температуры.

Несмотря на большое количество публикаций по этим кристаллам, интерес исследователей к ним не ослабевает в связи с привлекательностью их физических свойств. В работе [2] приводятся результаты исследований теплоемкости, параметров кристаллической решетки и фотопроводимости кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  в зависимости от температуры. В результате установлено, что эти кристаллы имеют ФП при температурах 135 и 184 K, связанные с образованием несоизмеримой фазы. В то же время исследования теплоемкости [3] не выявили ника-

ких аномалий в этой области температур. Аналогичные результаты получены при исследовании электрических и фотоэлектрических свойств [4]. Такое расхождение результатов, возможно, связано с влиянием политипии на ФП в кристаллах этой группы, как показывают, например, результаты исследований кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  [5].

В результате исследований электрофизических [6], оптических [7], тепловых [8] свойств кристаллов  $\text{TlGaTe}_2$  установлено, что для них характерен ФП второго рода при температуре 98.5 K.

В то же время влияние ионизирующего излучения на эти кристаллы изучено недостаточно, хотя, как показано в [9], на их основе могут быть изготовлены высокочувствительные миниатюрные детекторы. Поэтому важно изучить, как изменяются их различные физические свойства под действием ионизирующего излучения.

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей изменения диэлектрической проницаемости и электропроводности монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  под действием температуры и различных видов ионизирующего излучения.

### 2. Методика эксперимента

Электропроводность  $\sigma$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  монокристаллов измерялись с помощью цифрового измерителя E7-20 на частотах измерительного поля  $10^2 - 10^6 \text{ Hz}$ . Температурные зависимости  $\sigma$ ,  $\epsilon$  определялись в режиме квазистационарного непрерывного нагревания образца со скоростью  $\sim 0.5 \text{ K/min}$ . Образец помещался в специальный держатель, который опускался в пары жидкого азота. Температура образца измерялась хромель-копелевой термопарой, спай которой находился на поверхности образца. Регулировка температуры

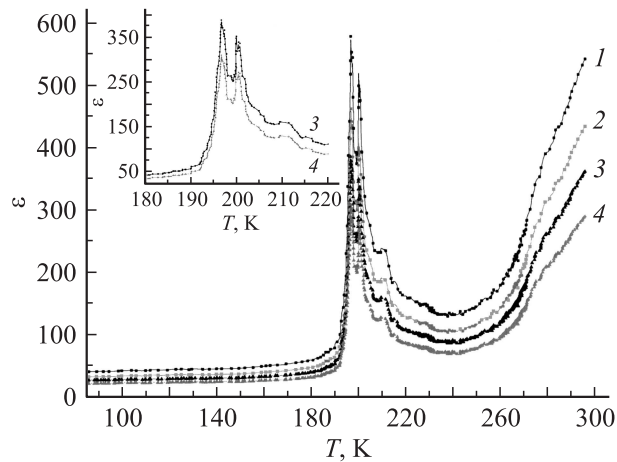
осуществлялась терморегулятором с помощью нагревателя, вмонтированного в держатель образца. В качестве образцов использовались монокристаллические пластинки исследуемых кристаллов толщиной  $\sim 1$  мм, вырезанные таким образом, чтобы их поверхности совпадали с кристаллографической плоскостью (001) с точностью  $5-10'$ . Исследовались как необлученные кристаллы, так и облученные  $\gamma$ -квантами и электронами.

### 3. Результаты исследований

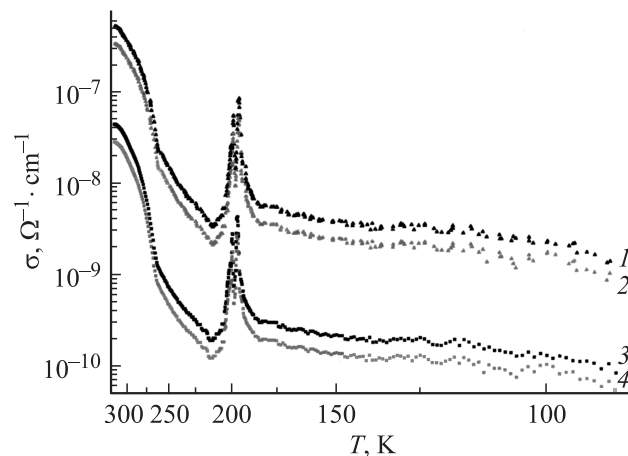
В интервале температур 90–320 К проведены исследования электропроводности и диэлектрической проницаемости облученных электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  и  $\gamma$ -квантами дозой  $10^7 \text{ R}$  монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  на частотах измерительного поля  $10^2-10^6 \text{ Hz}$ .

На рис. 1 представлены температурные зависимости диэлектрической проницаемости необлученных монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и облученных электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (только на частотах измерительного поля  $10^4$  и  $10^6 \text{ Hz}$ , чтобы не загромождать график). На кривых температурных зависимостях  $\epsilon$  обнаружен ряд аномалий в виде максимумов (см. вставку на рис. 1) при температурах 196,8, 200 и 210 К. Показано, что диэлектрическая проницаемость с ростом частоты уменьшается, что связано с релаксационными процессами в этих кристаллах. Подробные исследования диэлектрической релаксации для однотипных кристаллов  $\text{TlInS}_2$  приведены в [10]. Исследования диэлектрических характеристик кристалла  $\text{TlInS}_2$  в области существования несоизмерной фазы приведены в [11]. В этих работах показано, что в области фазового перехода несоизмерная фаза—соизмерная фаза при  $T_c = 204 \text{ K}$  в кристалле  $\text{TlInS}_2$  на кривых  $\epsilon = f(T)$  наблюдается аномалия в виде двух ярко выраженных максимумов.

Согласно [12], слабые нарушения кристаллической структуры (дефекты, примеси) могут приводить к расщеплению ФП, что и происходит в  $\text{TlInS}_2$ . Следует отметить, что полученные нами результаты для кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlGaTe}_2$  очень похожи на результаты, полученные в [10,11] для  $\text{TlInS}_2$ . Поэтому по аналогии можно предположить, что обнаруженные нами аномалии соответствуют последовательности фазовых переходов, обусловленной образованием несоизмерной фазы при  $T_1 = 210 \text{ K}$  и переходом ее в соизмерную с расщеплением ФП на два при  $T_2 = 196.8 \text{ K}$  и  $T_3 = 200 \text{ K}$ . Некоторые различия в значениях температур ФП в разных источниках для кристаллов  $\text{TlInSe}_2$ , как впрочем и для других соединений этой группы, вероятно, можно объяснить тем, что эти слоистые кристаллы склонны к политипизму. Кроме того, их физические свойства очень чувствительны к технологии выращивания монокристаллов, приготовления образцов, а также к условиям измерений скорости изменения температуры, количеству циклов измерений и т. п. [5,13].



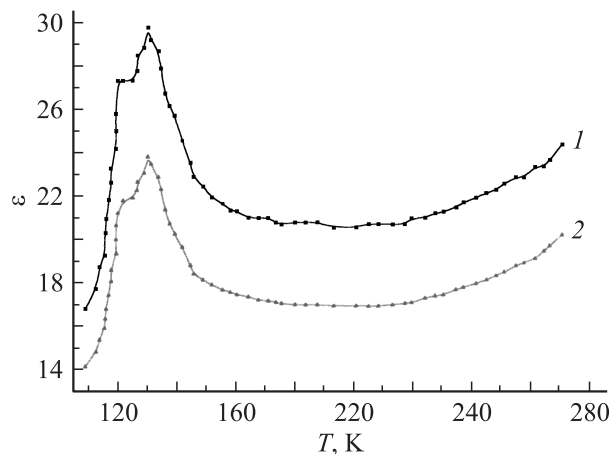
**Рис. 1.** Температурные зависимости диэлектрической проницаемости монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$ , необлученных (1, 3) и облученных электронами (2, 4), измеренные на частотах  $10^4$  (1, 2) и  $10^6 \text{ Hz}$  (3, 4).



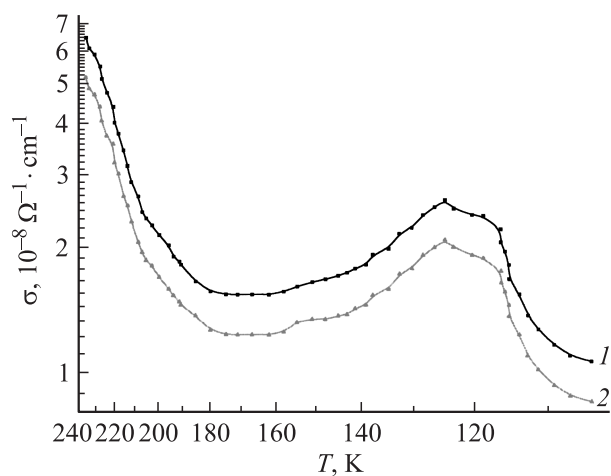
**Рис. 2.** Температурные зависимости удельной электропроводности монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$ , необлученных (1, 3) и облученных электронами (2, 4), измеренные на частотах  $10^6$  (1, 2) и  $10^4 \text{ Hz}$  (3, 4).

Облучение монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  электронами приводит к уменьшению величины  $\epsilon$  и высоты пиков, что, вероятно, связано с изменением периода релаксации из-за наведенных дефектов. Облучение кристаллов электронами дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  не оказывает существенного влияния на температуры ФП в этих кристаллах.

На рис. 2 представлены температурные зависимости удельной электропроводности необлученных и облученных электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  на частотах  $10^4$  и  $10^6 \text{ Hz}$ . На температурных зависимостях электропроводности также обнаружены аномалии, соответствующие ФП. Обнаружена дисперсия электропроводности. Показано, что облучение монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  электронами вызывает уменьшение значений проводимости. Это связано с увеличением дефектности кристаллической структуры



**Рис. 3.** Температурные зависимости диэлектрической проницаемости необлученных (1) и облученных электронами (2) кристаллов  $\text{TiGaTe}_2$  на частоте  $10^6$  Hz.



**Рис. 4.** Температурные зависимости удельной электропроводности необлученных (1) и облученных электронами (2) кристаллов  $\text{TiGaTe}_2$  на частоте  $10^6$  Hz.

под действием электронного облучения, что приводит к уменьшению прыжковой проводимости, которая в этих кристаллах преобладает при низких температурах.

На рис. 3 и 4 приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности необлученных и облученных электронами монокристаллов  $\text{TiGaTe}_2$  на частоте измерительного поля  $10^6$  Hz. На температурных зависимостях  $\varepsilon = f(T)$  и  $\sigma = f(T)$  обнаружены аномалии в виде максимумов. Это указывает на наличие в кристаллах  $\text{TiGaTe}_2$  последовательности ФП с температурами  $T_c = 121$  К и  $T_i = 130.3$  К. Как видно из рисунков, здесь характер температурных зависимостей  $\varepsilon = f(T)$  и  $\sigma = f(T)$  по сравнению с  $\text{TlInSe}_2$  несколько иной. На кривых  $\varepsilon = f(T)$  и  $\sigma = f(T)$  наблюдаются аномалии, которые по аналогии можно отнести к фазовым переходам парафаза–несоразмерная фаза  $T_i = 130.3$  К и несоразмерная

фаза–соразмерная фаза  $T_c = 121$  К. Однако никакого расщепления ФП не наблюдается.

В результате проведенных исследований установлено, что облучение монокристаллов  $\text{TiGaTe}_2$  электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  так же как и у  $\text{TlInSe}_2$ , приводит к уменьшению величин диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности. Влияния облучения на температуры ФП не обнаружено.

Проведены исследования влияния облучения  $\gamma$ -квантами дозой  $10^7$  R на диэлектрическую проницаемость и электропроводность монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$ . Установлено, что температурные зависимости  $\varepsilon = f(T)$  и  $\sigma = f(T)$  необлученных  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$  и облученных  $\gamma$ -квантами дозой  $10^7$  R в пределах погрешности измерений совпадают.

#### 4. Заключение

В результате исследования диэлектрических свойств слоисто-цепочечных монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$  установлено, что с увеличением температуры электропроводность и диэлектрическая проницаемость исследованных кристаллов растет. Обнаружена дисперсия диэлектрических характеристик, связанная с релаксационными процессами. Выявлены последовательности фазовых превращений парафаза–несоразмерная фаза–соразмерная фаза в кристаллах  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TiGaTe}_2$ . Показано, что облучение исследованных монокристаллов электронами с энергией 4 MeV дозой  $10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  приводит к уменьшению величин электропроводности, удельной диэлектрической проницаемости и частичному сглаживанию пиков, соответствующих ФП. Установлено, что облучение не оказывает влияния на температуры ФП.

#### Список литературы

- [1] V.D. Muller, H. Hahn. Z. Anorg. Allg. Chem. **438**, 258 (1982).
- [2] O.Z. Alekperov, M.A. Aljanov, E.M. Kerimova. Turkish J. Phys. **22**, 1053 (1998).
- [3] М.М. Курбанов, Д.Д. Байрамов, Н.С. Сарданова. Неорган. материалы **36**, 2, 183 (2000).
- [4] Г.Д. Гусейнов, А.Г. Абдулаев, З.А. Азимов. Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук **2**, 91 (1980).
- [5] Н.А. Боровой, Ю.П. Гололобов, Г.Л. Исаенко, Н.Б. Степанищев. ФТТ **51**, 11, 2229 (2009).
- [6] H. Hahn, V. Weltman. Naturwissenschaften **54**, 2, 42 (1967).
- [7] N.M. Gasanly, A.F. Goncharov, B.N. Dzhavadov. Phys. Status Solidi B **97**, 367 (1980).
- [8] Э.М. Годжаев, Д.М. Кафарова. Неорган. материалы **40**, 9, 1060 (2004).
- [9] И.В. Алексеев. ПТЭ **3**, 9 (2008).
- [10] E. Senturk, L. Tumbek, F.A. Mikailov, F. Salehli. Cryst. Res. Technol. **42**, 6, 626 (2007).
- [11] F.A. Mikailov. Cryst. Res. Technol. **44**, 1, 52 (2009).
- [12] Р.А. Сулейманов, М.Ю. Сеидов, Ф.М. Салаев, Ф.А. Микайлов. ФТТ **35**, 348 (1993).
- [13] В.А. Алиев, М.А. Алджанов. Неорган. материалы **34**, 3, 274 (1998).