

## Влияние $\gamma$ -облучения на электропроводность и диэлектрические свойства кристаллов $\text{TlGaSe}_2$ при низких температурах

© А.У. Шелег, К.В. Иодковская, Н.Ф. Курилович

Институт физики твердого тела и полупроводников Академии наук Белоруссии,  
220072 Минск, Белоруссия

(Поступила в Редакцию 21 января 1998 г.)

В области температур 100–280 К, включающей несоизмерную фазу, проведены исследования электропроводности и диэлектрических свойств монокристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  в зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения. Показано, что в точках переходов из парафазы в несоизмерную фазу (НФ)  $T_i$  и из НФ в соизмерную  $T_c$  на кривых  $\sigma = f(T)$ ,  $\text{tg } \delta = f(T)$  и  $\varepsilon = f(T)$  наблюдаются аномалии в виде максимумов. С ростом дозы облучения величины  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\varepsilon$  сначала растут, затем сильно уменьшаются, а аномалии исчезают. Установлено, что  $\gamma$ -облучение не влияет на температуры фазовых переходов  $T_i$  и  $T_c$ .

Кристаллы  $\text{TlGaSe}_2$  относятся к большой группе тройных широкозонных полупроводников  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2^6$ , обладающих сегнетоэлектрическими свойствами. Характерной особенностью этих кристаллов является то, что они обладают ярко выраженной слоистой кристаллической структурой. Интерес к кристаллам полупроводниковых соединений семейства  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2^6$  обусловлен тем, что они по своим физическим и технологическим свойствам являются перспективным материалом для использования в оптической электронике [1]. Кроме того, в кристаллах этого семейства в области низких температур при атмосферном давлении с понижением температуры наблюдается последовательность фазовых переходов из исходной параэлектрической фазы в несоизмерную фазу (НФ) и далее из НФ в соизмерную сегнетоэлектрическую фазу. Что касается кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$ , то методом дифракции нейтронов [2] было показано, что переход из парафазы в НФ происходит при  $T_i = 120$  К, а из НФ в соизмерную — при  $T_c = 107$  К. Недавно рентгенографическим методом [3] было подтверждено существование НФ в кристалле  $\text{TlGaSe}_2$  в области температур  $T_i(117 \text{ К})$ – $T_c(110 \text{ К})$ . При низкотемпературных исследованиях диэлектрических [4], упругих [5,6] и тепловых [7] свойств кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  в областях температур, соответствующих переходам, были обнаружены аномалии.

Следует иметь в виду, что фазовые переходы, связанные с модулированными структурами, очень чувствительны к различного рода искажениям кристаллической решетки, примесям, дислокациям и т.п. Поэтому температуры фазовых переходов  $T_i$  и  $T_c$ , измеренные разными методами и на разных образцах, приведенные в литературе, как правило, отличаются друг от друга на несколько градусов, что вполне объяснимо состоянием исследуемых образцов.

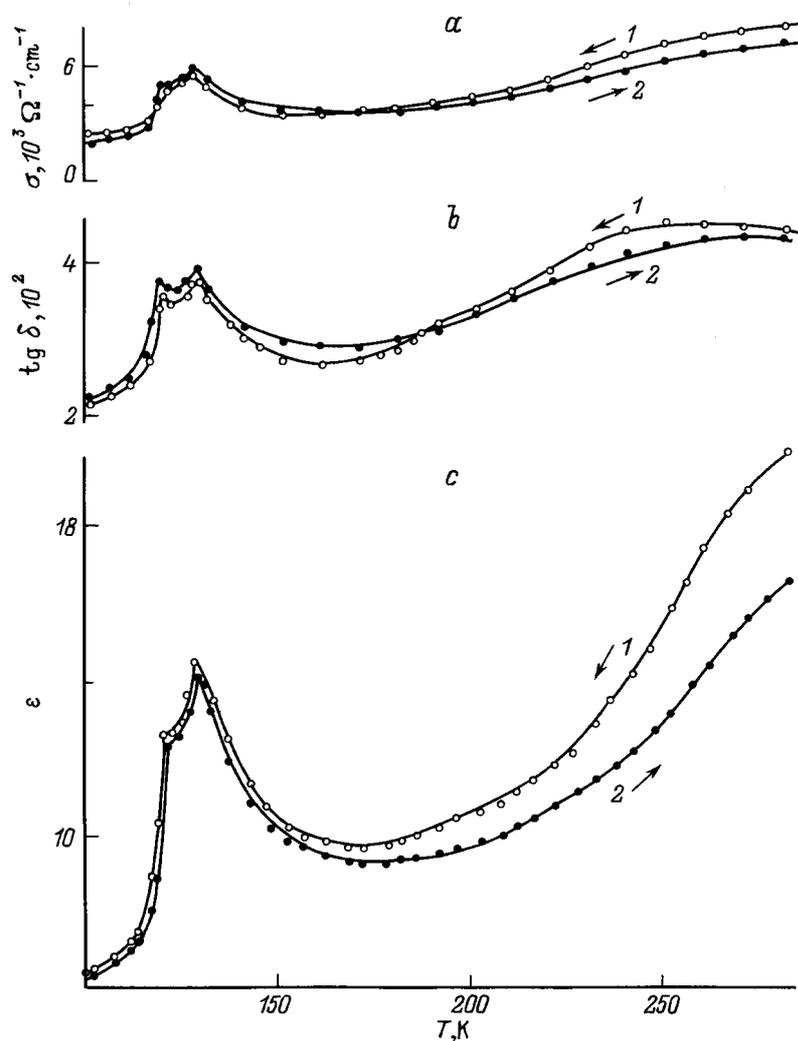
Характерной особенностью кристаллов с несоизмерными фазами является то, что в результате взаимодействия модуляции, возникающей в кристалле, с примесями и дефектами кристаллической решетки происходит изменение характера температурной зависимости физических свойств, особенно ярко проявляющееся в области фазовых переходов.

В данной работе приведены результаты исследования влияния радиационных дефектов ( $\gamma$ -облучения) на электропроводность и диэлектрические свойства кристаллов  $\text{TlGaSe}_2$  в интервале температур 100–280 К, включающем область существования несоизмерной фазы.

Измерения электропроводности  $\sigma$ , диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  проводились с помощью цифрового измерителя Е7-12 на частоте 1 МГц методом циклического охлаждения–нагрева со скоростью 0.5 К/мин. Образцами служили тонкие монокристаллические пластинки толщиной 0.5–0.8 мм, поверхности которых представляли собой плоскости скола (001). В качестве контактов использовалась серебряная паста, которая наносилась на поверхность образцов, а затем вжигалась при температуре  $\sim 350$  К в течение нескольких часов. Образец помещался в специальный держатель, который опускался в пары азота. Температура образца измерялась хромель-копелевой термопарой, спай которой находился на поверхности образца. Регулировка температуры осуществлялась с помощью нагревателя, который был смонтирован в держатель образцов.

Облучение образцов проводилось при комнатной температуре на  $\gamma$ -установке от источника  $\text{Co}^{60}$  с мощностью в зоне облучения  $\sim 180$  Р/с. Доза облучения накапливалась путем последовательных экспозиций в одном и том же образце постепенно и составила 1, 10, 100 и 200 МР.

На рис. 1 приведены температурные зависимости  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\varepsilon$  необлученных образцов  $\text{TlGaSe}_2$ , измеренные в циклическом режиме охлаждения–нагрева. Как видно из этого рисунка, на кривых  $\sigma(T)$ ,  $\text{tg } \delta(T)$  и  $\varepsilon(T)$  в области существования НФ наблюдается резкое увеличение значений измеряемых величин с четкими аномалиями в виде максимумов в точках температур фазовых переходов из парафазы в НФ при  $T_i = 120$  К и из НФ в соизмерную сегнетоэлектрическую фазу при  $T_c = 111$  К. Следует отметить, что аналогичные формы аномалии в области существования НФ в  $\text{TlGaSe}_2$  и характер температурной зависимости диэлектрической проницаемости были получены в [8].



**Рис. 1.** Температурные зависимости электропроводности  $\sigma$  (а), тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  (б) и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  (с) для необлученных кристаллов  $TiGaSe_2$ . 1 — охлаждение, 2 — нагревание.

На рис. 2 приведены кривые температурных зависимостей  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  образцов  $TiGaSe_2$ , облученных дозой 100 MR. Из этого рисунка видно, что облучение приводит к увеличению значений  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  во всей температурной области измерения, что можно, вероятно, объяснить процессом радиационного отжига дефектов кристаллической решетки. При дальнейшем увеличении дозы облучения до 200 MR происходит уменьшение значений  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  по всей исследованной области температур (рис. 3). Максимумы на кривых  $\sigma(T)$  и  $\text{tg } \delta(T)$  полностью исчезают, а на кривой  $\epsilon(T)$  аномалия в области существования НФ резко уменьшается. Происходит радиационно-стимулированное старение образцов, связанное с активизацией процесса миграции естественных дефектов под влиянием  $\gamma$ -облучения, приводящее к стабилизации доменной структуры и снижению значений измеряемых величин [9]. Значения величин  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  образцов  $TiGaSe_2$ , облученных дозами 1 и 10 MR, как показали результаты экспериментов,

являются промежуточными между соответствующими величинами необлученных образцов и облученных дозой 100 MR.

Из приведенных рисунков видно, что в области температур 170–280 К значения измеренных параметров  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  с ростом температуры увеличиваются; кроме того, наблюдается гистерезис. Увеличение значений  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  с ростом температуры в области 170–280 К носит закономерный характер и обусловлено увеличением концентрации свободных носителей зарядов (проявление полупроводниковых свойств) и разрушением доменной структуры (проявление сегнетоэлектрических свойств). При охлаждении величины  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  оказываются большими, чем при нагревании, что связано с тем, что разрушенная доменная структура находится в возбужденном неравновесном состоянии и при охлаждении происходит термическое обновление образцов, которому свойственны повышенные значения  $\sigma$ ,  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  [9]. Следует отметить, что при циклических измерениях

охлаждение–нагрев как для необлученных, так и для облученных образцов наблюдается гистерезис всех измеренных свойств, кроме  $\sigma(T)$  (рис. 3, *a*), особенно ярко проявляющийся в более высоких областях температур. Однако температуры фазовых переходов  $T_i$  и  $T_c$  в этих кристаллах гистерезиса не испытывают.

Известно, что  $\gamma$ -облучение влияет на температуры фазовых переходов в сегнетоэлектриках, и, как правило, с ростом дозы облучения температура фазовых переходов уменьшается [10–12], хотя для некоторых кристаллов растет [13]. Для кристаллов  $\text{TiGaSe}_2$ , как видно из рисунков,  $\gamma$ -облучение не влияет на величины температур фазовых переходов  $T_i$  и  $T_c$ . Такой же результат был получен и для кристаллов  $\text{TlInS}_2$  [14]. Возможно, это в некоторой мере связано с природой и характером

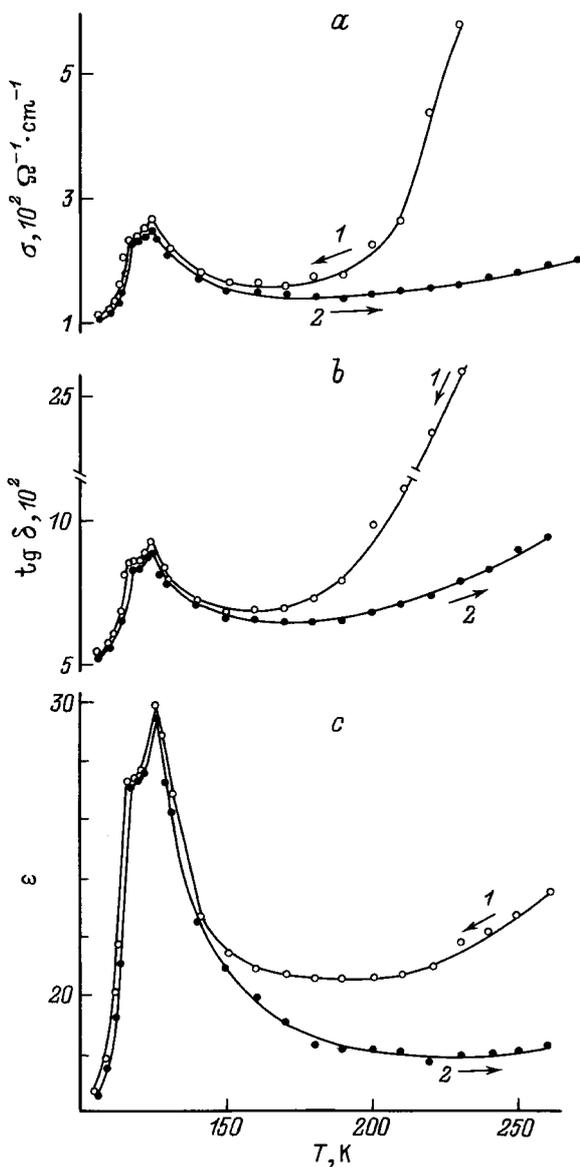


Рис. 2. Температурные зависимости  $\sigma$  (*a*),  $\text{tg } \delta$  (*b*) и  $\epsilon$  (*c*) для  $\gamma$ -облученных кристаллов  $\text{TiGaSe}_2$  дозой 100 MR. 1 — охлаждение, 2 — нагревание.

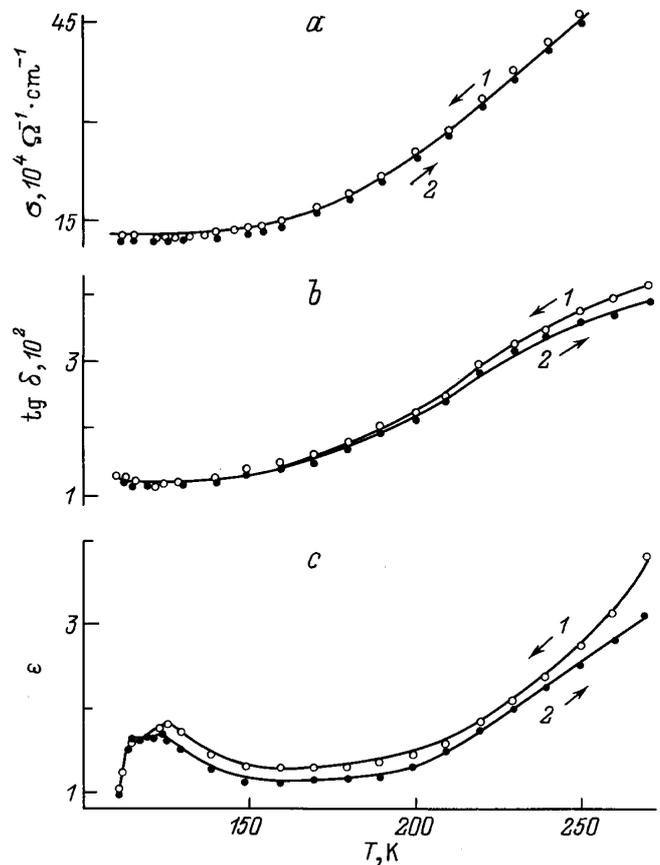


Рис. 3. Температурные зависимости  $\sigma$  (*a*),  $\text{tg } \delta$  (*b*) и  $\epsilon$  (*c*) для  $\gamma$ -облученных кристаллов  $\text{TiGaSe}_2$  дозой 200 MR. 1 — охлаждение, 2 — нагревание.

химической связи в кристаллах. Изменение температуры фазовых переходов под действием  $\gamma$ -облучения происходит в водорастворимых кристаллах — сегнетоэлектриках группы  $\text{A}_2\text{BX}_4$ , имеющих ионный характер химической связи, характеризующийся слабыми силами межатомного взаимодействия. Кристаллы типа  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2$ , такие как  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TiGaSe}_2$ , имеют слоистую кристаллическую структуру, и, хотя силы связи между слоями слабые, в слоях доля ковалентной составляющей химической связи атомов является значительной, и энергия  $\gamma$ -квантов недостаточно высокая, чтобы повлиять на существенные структурные изменения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Белоруссии.

## Список литературы

- [1] Р.Балтрамеюнас, А. Жукаускас, Н. Зейналов, Э. Куокшитис. ФТП **17**, 10, 1898 (1983).
- [2] С.Б. Вахрушев, Б.Е. Квятковский, Н.М. Окунева, К.Р. Аллахвердиев, Р.М. Сардарлы. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 886. Л. (1984).

- [3] D.F. McMorrow, R.A. Cowley, P.D. Hatton, J. Banys. *J. Phys.: Condens. Matter* **2**, 16, 3699 (1990).
- [4] А.А. Волков, Ю.Г. Гончаров, Г.В. Козлов, С.П. Лебедев, А.М. Прохоров, Р.А. Алиев, К.Р. Аллахвердиев. *Письма в ЖЭТФ* **37**, 2, 517 (1983).
- [5] Р.А. Сулейманов, М.Ю. Сеидов, Ф.М. Салаев. *ФТТ* **33**, 6, 1797 (1991).
- [6] Ю.В. Илсавский, В.М. Стернин, Р.А. Сулейманов, Ф.М. Салаев, М.Ю. Сеидов. *ФТТ* **33**, 1, 104 (1991).
- [7] С.Г. Абдулаева, А.М. Абдулаев, К.К. Мамедов, Н.Т. Мамедов. *ФТТ* **26**, 2, 618 (1984).
- [8] А.К. Абиев, Н.А. Бахышов, А.Э. Бахышов, М.С. Гаджиев. *Изв. вузов. Физика* **32**, 12, 84 (1989).
- [9] Е.В. Пешиков. *Радиационные эффекты в сегнетоэлектриках*. Ташкент (1986). 138 с.
- [10] Б.А. Струков, К.А. Минаева, Г.П. Спиридонов. *ФТТ* **31**, 3, 288 (1989).
- [11] Т.Р. Волк, И. Рахимов, В.М. Сарнацкий, Е.В. Чарная, Л.А. Шувалов, В.А. Шутилов. *ФТТ* **27**, 12, 3613 (1985).
- [12] M.E. Kassem, M. El-Muraikhi, L. Al-Houty, A.A. Mohamed. *Phase Trans.* **38**, 229 (1992).
- [13] А.У. Шелег, И.А. Афонская, К.В. Иодковская, Е.М. Зуб, Н.Ф. Курилович, Л.Е. Сошников. *ФТТ* **37**, 5, 1492 (1995).
- [14] А.У. Шелег, К.В. Иодковская, С.В. Родин, В.А. Алиев. *ФТТ* **39**, 6, 1088 (1997).