

03

Анизотропия проводимости цепочечного монокристалла TlGaTe_2 под гидростатическим давлением

© С.Н. Мустафаева¹, Ш.Г. Гасымов¹, Э.М. Керимова¹, М.М. Асадов²

¹ Институт физики НАН Азербайджана,
Баку, Азербайджан

² Институт химических проблем НАН Азербайджана,
Баку, Азербайджан

E-mail: mirasadov@gmail.com

(Поступила в Редакцию 1 июня 2011 г.)

Изучены барические и температурные зависимости степени анизотропии проводимости цепочечных монокристаллов TlGaTe_2 . Установлено, что с помощью подбора значений температуры и давления можно управлять степенью анизотропии проводимости TlGaTe_2 . Определены температуры (216, 193 и 77 К) и соответствующие им давления (0, 0.31 и 0.71 GPa), при которых проводимость монокристалла TlGaTe_2 становится изотропной.

Цепочечные монокристаллы TlGaTe_2 являются представителями полупроводников группы $\text{IIV}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$. Они характеризуются анизотропными физическими свойствами, обусловленными в основном тем, что носители заряда в них могут свободно двигаться внутри цепей, а между цепями их движение ограничено из-за ван-дер-ваальсового взаимодействия и малого перекрытия волновых функций соседних цепей. Важным параметром цепочечных соединений является анизотропия электропроводности

$$N = \sigma_{\parallel} / \sigma_{\perp}, \quad (1)$$

где σ_{\parallel} и σ_{\perp} — электропроводность вдоль и поперек цепей кристалла.

Следует отметить, что степень анизотропии кристаллов может быть увеличена за счет их интеркалирования, т.е. введения инородных ионов, атомов или молекул в межцепочечные ван-дер-ваальсовы пространства. Так, в [1] было показано, что при интеркалировании цепочечных монокристаллов TlInSe_2 ионами лития степень анизотропии проводимости увеличивается в 2–2.5 раза за счет уменьшения во столько же раз проводимости поперек цепей, тогда как вдоль цепей проводимость кристаллов почти не изменялась. Степень анизотропии проводимости также зависит от температуры и давления. Влияние гидростатического давления вплоть до 0.9 GPa на электропроводность и коэффициент Холла монокристалла TlGaTe_2 было изучено в [2] при комнатной температуре. В [3] приведены результаты изучения кинетических свойств монокристаллов TlGaTe_2 в зависимости от гидростатического давления при температурах от 220 до 295 К. Электрические свойства при постоянном токе поперек цепей монокристаллов TlGaTe_2 в интервале температур 77–296 К в зависимости от гидростатического давления изучены в [4,5]. Было показано, что проводимость σ_{\perp} монокристаллов TlGaTe_2 существенно увеличивается по мере роста гидростатического давления до 0.82 GPa. По данным низкотемпературных электрических измерений было установлено наличие прыжкового механизма проводимости с переменной

длиной прыжка поперек цепей монокристалла TlGaTe_2 . Полученные экспериментальные результаты позволили определить параметры локализованных состояний в TlGaTe_2 при различных значениях гидростатического давления. Установлено, что с увеличением давления плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми экспоненциально уменьшается, а среднее расстояние прыжков, энергетический разброс локализованных состояний и энергия активации прыжков в TlGaTe_2 линейно увеличиваются. О прыжковой проводимости в TlGaTe_2 сообщалось также в [6].

Целью настоящей работы является изучение степени анизотропии проводимости цепочечных монокристаллов TlGaTe_2 в зависимости от температуры и гидростатического давления.

Монокристаллы TlGaTe_2 были выращены методом Бриджмена. Они характеризовались тетрагональной структурой (пр. гр. $I4/mcm$) и имели параметры элементарной ячейки $a = 8.430 \pm 0.002 \text{ \AA}$, $b = 6.858 \pm 0.004 \text{ \AA}$ при комнатной температуре.

Далее приведены результаты изучения проводимости монокристаллов TlGaTe_2 в постоянном электрическом поле при различных температурах и гидростатических давлениях. В качестве контактного материала к образцам TlGaTe_2 был использован индий, который расплавлялся в монокристаллы и создавал омические контакты. Образцы для измерений были изготовлены в двух геометрических конфигурациях так, чтобы электрический ток был направлен вдоль (σ_{\parallel}) и поперек (σ_{\perp}) цепей кристалла. Амплитуда внешнего постоянного электрического поля, приложенного к образцу, соответствовала омической области вольт-амперной характеристики исследуемого монокристалла TlGaTe_2 . Область температур, при которых проводились измерения σ_{\parallel} и σ_{\perp} , составляла 77–296 К. Электрические измерения образцов TlGaTe_2 под гидростатическим давлением проводились по методике, описанной в [2]. Значения гидростатического давления варьировались в пределах от 0 до 0.82 GPa.

На рис. 1 и 2 представлены температурные зависимости σ_{\parallel} и σ_{\perp} для монокристалла TlGaTe_2 при различных значениях гидростатического давления. Наклоны высокотемпературных ветвей зависимостей $\lg \sigma_{\parallel}(1/T)$ и $\lg \sigma_{\perp}(1/T)$ составляли $E_t = 0.29$ eV при $P = 0$ и 0.31 GPa и $E_t = 0.15-0.19$ eV при $P = 0.51$ и 0.71 GPa. С уменьшением температуры наклон зависимостей $\sigma_{\parallel}(1/T)$ и $\sigma_{\perp}(1/T)$ монотонно уменьшался, и при $T < 120$ K значения σ_{\parallel} и σ_{\perp} слабо зависели от температуры при всех давлениях, кроме $P = 0.71$ GPa. Как было отмечено в [5], указанная аномалия на зависимости $\sigma_{\perp}(1/T)$ при низких температурах и $P = 0.71$ GPa соответствует фазовому переходу, стимулированному высоким гидро-

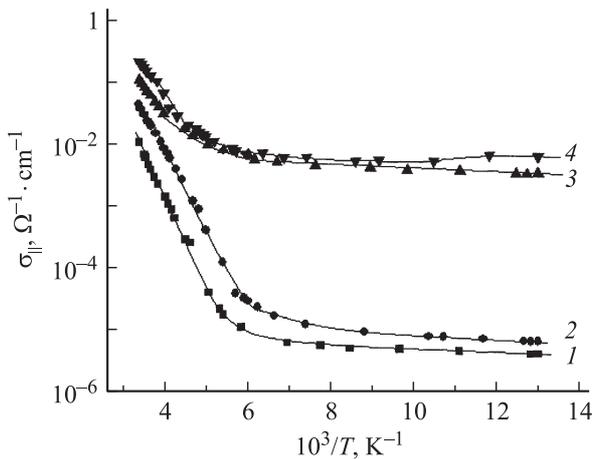


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости вдоль цепей монокристалла TlGaTe_2 при различных гидростатических давлениях. P , GPa: 1 — 0, 2 — 0.31, 3 — 0.51, 4 — 0.71.

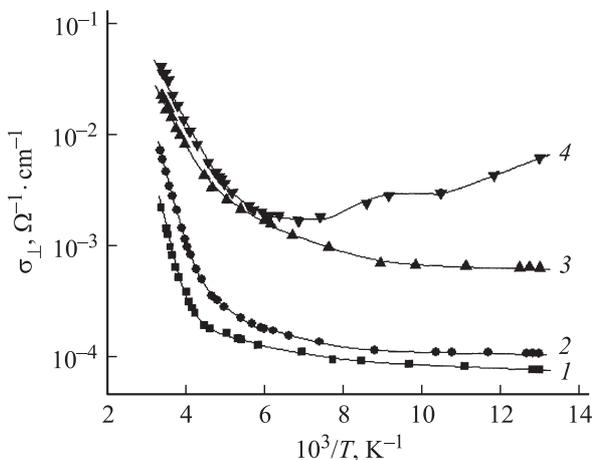


Рис. 2. Температурные зависимости проводимости поперек цепей монокристалла TlGaTe_2 при различных гидростатических давлениях. P , GPa: 1 — 0; 2 — 0.31, 3 — 0.51, 4 — 0.71.

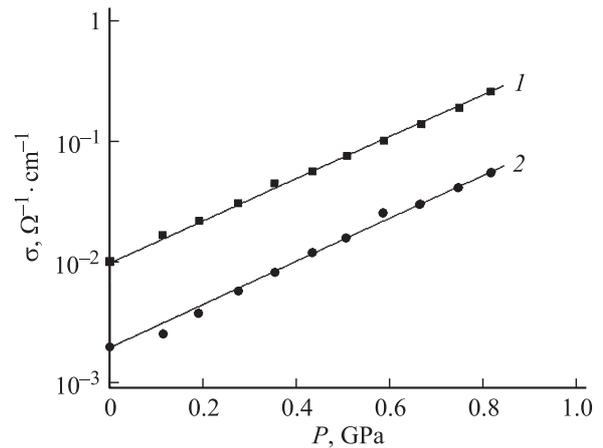


Рис. 3. Барические зависимости σ_{\parallel} (1) и σ_{\perp} (2) монокристалла TlGaTe_2 при $T = 293$ K.

статическим давлением. О фазовом переходе в TlGaTe_2 при $T = 98.5$ K сообщалось в работах [7–9], в которых были изучены электрические, оптические и тепловые свойства этих монокристаллов. Последовательность фазовых переходов в монокристалле TlGaTe_2 была обнаружена на температурных зависимостях проводимости и диэлектрической проницаемости [10]. Так, на кривых $\varepsilon(T)$ и $\sigma(T)$ наблюдались аномалии, которые были отнесены к фазовым переходам парафаза–несоизмерная фаза ($T_i = 130.3$ K) и несоизмерная фаза–соизмерная фаза ($T_c = 121$ K).

Индукцированный высоким давлением фазовый переход при $P = 0.72$ GPa был также обнаружен нами в монокристаллах $\text{TlInSe}_{1-x}\text{S}_x$ [11].

На рис. 3 представлены барические зависимости проводимостей σ_{\parallel} и σ_{\perp} монокристалла TlGaTe_2 при комнатной температуре. Характерной особенностью этих кривых является то, что с увеличением давления вплоть до 0.82 GPa σ_{\parallel} и σ_{\perp} экспоненциально увеличиваются. Проводимость (как σ_{\parallel} , так и σ_{\perp}) может быть записана в общем виде

$$\ln \sigma(P) = \ln \sigma(0) + \beta P, \quad (2)$$

где $\beta = d \ln \sigma(P) / dP = 4.02 \text{ GPa}^{-1}$.

Полагая, что проводимость изменяется с давлением согласно уравнению

$$\sigma(P) = \sigma(0) \exp(-\gamma P / 2kT) \quad (3)$$

(где $\gamma = dE_g^i / dP$ — барический коэффициент непрямой зоны), последний можно найти из соотношения

$$|\gamma| = 2kT\beta. \quad (4)$$

Поскольку $\beta > 0$, из (4) следует, что для удовлетворения уравнения (3) значение γ должно быть отрицательным. Отсюда следует, что с увеличением давления ширина запрещенной зоны TlGaTe_2 уменьшается.

Зависимость ширины запрещенной зоны TlGaTe_2 от давления может быть записана как

$$E_g^i(P) = E_g^i(0) - |\gamma|P, \quad (5)$$

где $|\gamma| = 0.207 \text{ eV/GPa}$.

Полученные при комнатной температуре барические зависимости σ_{\parallel} и σ_{\perp} показывают, что степень анизотропии проводимости $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ в $TiGaTe_2$ практически не зависит от гидростатического давления вплоть до 0.82 ГПа.

Сильное влияние на степень анизотропии проводимости $TiGaTe_2$ оказывает температура. На рис. 4 приведены температурные зависимости $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ для $TiGaTe_2$ при различных значениях гидростатического давления.

При $P = 0$ с понижением температуры значение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ вначале резко спадало (примерно на два порядка) по экспоненциальному закону. Такой же резкий спад $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ после незначительного роста имел место и при $P = 0.31$ ГПа. Ниже 170 К как при $P = 0$, так и при $P = 0.31$ ГПа степень анизотропии проводимости слабо зависела от температуры. При $P = 0.51$ и 0.71 ГПа резкого спада $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ с понижением температуры не наблюдалось.

Как видно из рис. 4, отношение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ при $P = 0$ и 0.31 ГПа при температурах 216 и 193 К соответственно равно единице. Это указывает на то, что при данных

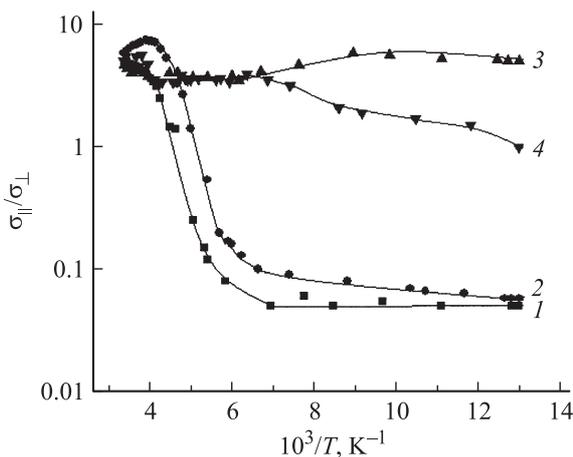


Рис. 4. Температурные зависимости степени анизотропии проводимости монокристалла $TiGaTe_2$ при различных гидростатических давлениях. P , ГПа: 1 — 0, 2 — 0.31, 3 — 0.51, 4 — 0.71.

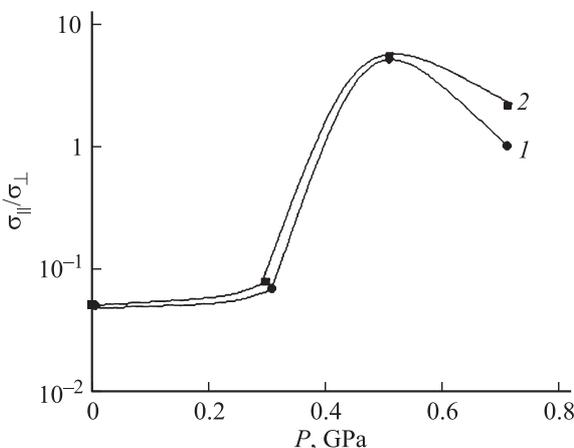


Рис. 5. Барические зависимости степени анизотропии проводимости монокристалла $TiGaTe_2$ при температурах 77 (1) и 116 К (2).

температурах и давлениях проводимости монокристалла $TiGaTe_2$ вдоль и поперек его цепей становятся равными по величине, т.е. проводимость становится изотропной.

При $P = 0$ и 0.31 ГПа с уменьшением температуры ниже 216 и 193 К соответственно отношение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ становится меньше единицы. Этот факт свидетельствует о том, что проводимость монокристалла $TiGaTe_2$ вдоль его цепей становится при указанных температурах меньше, чем поперек цепей, и это имеет место вплоть до 77 К. При $P = 0.51$ ГПа отношение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ изменялось незначительно и варьировалось вблизи значения, равного 5, во всем исследованном интервале температур. При $P = 0.71$ ГПа степень анизотропии проводимости уменьшалась с понижением температуры, и при 77 К анизотропия проводимости переставала иметь место, т.е. $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp} = 1$.

Следует отметить, что в отличие от комнатной температуры, когда $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ в $TiGaTe_2$ почти не зависит от давления, при низких температурах степень анизотропии проводимости сильно зависит от величины гидростатического давления.

На рис. 5 представлены барические зависимости степени анизотропии проводимости $TiGaTe_2$ при двух температурах: 77 и 116 К. В обоих случаях наблюдается резкий рост $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ с повышением давления до 0.51 ГПа, а с дальнейшим увеличением давления значение $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ спадало.

Таким образом, изучение температурных и барических зависимостей степени анизотропии проводимости в $TiGaTe_2$ показало, что при комнатной температуре $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ почти не зависит от давления, тогда как при низких температурах имеет место довольно сильная барическая зависимость $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$. Подбор значений давлений и температур позволял управлять степенью анизотропии проводимости $TiGaTe_2$ вплоть до полного ее снятия.

Список литературы

- [1] S.N. Mustafaeva, V.A. Ramazanade, M.M. Asadov. *Mater. Chem. Phys.* **40**, 142 (1995).
- [2] К.Р. Аллахвердиев, Ш.Г. Гасымов, Т.Г. Мамедов, Э.Ю. Са- лаев, А.Н. Толмачев, А.М. Широков. *ФТП* **16**, 1916 (1982).
- [3] K.R. Allakhverdiev, Sh.G. Gasymov, T.G. Mamedov. *Phys. Status Solidi A* **94**, K143 (1986).
- [4] S.N. Mustafaeva, Sh.G. Gasymov, E.M. Kerimova. *Abstracts of 17th Int. Conf. on ternary and multinary compounds (ICTMC-17)*. Baku (2010). P. 105.
- [5] S.N. Mustafaeva, Sh.G. Gasymov, E.M. Kerimova, M.M. Asadov. *J. Phys. Chem. Solids* **72**, 657 (2011).
- [6] R.M. Sardarly, O.A. Samedov, A.P. Abdullaev, A.A. Bayramov, F.T. Salmanov, G.R. Safarova. *Fizika* **15**, 91 (2009).
- [7] H. Hahn, B. Weltman. *Naturwissenschaften* **2**, 42 (1967).
- [8] N.M. Gasanly, A.F. Goncharov, B.N. Dzhavadov. *Phys. Status Solidi B* **97**, 367 (1980).
- [9] В.А. Алиев, М.А. Алиджанов, С.Н. Алиев. *Письма в ЖЭТФ* **45**, 418 (1987).
- [10] А.У. Шелег, В.Г. Гуртовой, С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимо- ва. *ФТТ* **53**, 443 (2011).
- [11] E.M. Kerimova, S.N. Mustafaeva, D.A. Guseinova, I.A. Efendieva, S.S. Babaev, T.G. Mamedov, T.S. Mamedov, Z.Yu. Salae- va, K.R. Allakhverdiev. *Phys. Status Solidi A* **179**, 199 (2000).