

05;07

Электропроводность монокристаллов $MnGaInSe_4$ на переменном токе© Н.Н. Нифтиев¹, Ф.М. Мамедов², М.Б. Мурадов³¹ Азербайджанский государственный педагогический университет, Баку, Азербайджан² Институт катализа и неорганической химии им. акад. М. Нагиева НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан³ Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

E-mail: namiq7@bk.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 11 февраля 2020 г.

Принято к публикации 10 марта 2020 г.

Приводятся результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности монокристаллов $MnGaInSe_4$ на переменном электрическом токе. Установлено, что в температурном интервале 295.5–360 К при частотах $2 \cdot 10^4$ – 10^6 Hz для электропроводности выполняется закономерность $\sigma \sim f^S$ ($0.1 \leq S \leq 1.0$). Показано, что в монокристалле $MnGaInSe_4$ зависимость электропроводности от частоты можно объяснить при помощи мультиплетной модели, а проводимость в этих монокристаллах характеризуется зонно-прыжковым механизмом. На основе зависимостей $\lg \sigma \sim 10^3/T$ определены энергии активации.

Ключевые слова: переменный ток, электропроводность, частота, зонно-прыжковый механизм, энергия активации, $MnGaInSe_4$.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.11.49493.18241

В последние годы значительное внимание уделяется магнитным полупроводникам типа AB_2X_4 ($A = Mn, Fe, Co, Ni$; $B = Ga, In$; $X = S, Se, Te$) [1–10]. Эти соединения обладают уникальными физическими свойствами, что дает основание полагать перспективным их использование для изготовления ряда оптоэлектронных приборов нового класса, управляемых с помощью магнитного поля. В [11] при соотношении 1:1 гексагональной структуры $MnIn_2Se_4$ (пространственная группа $R3m$) и тетрагональной структуры $MnGa_2Se_4$ (пространственная группа $I4$) получены новые слоистые полумангнитные полупроводники состава $MnGaInSe_4$ и исследована их кристаллическая структура.

В настоящей работе приводятся результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности монокристаллов $MnGaInSe_4$ на переменном электрическом токе.

Монокристаллы $MnGaInSe_4$ были получены методом Бриджмена. С помощью рентгенографического метода установлено, что монокристаллы кристаллизуются в тригональной сингонии с параметрами решетки $a = 3.9812(4) \text{ \AA}$, $c = 12.9904(1) \text{ \AA}$, $V = 178.32(4) \text{ \AA}^3$, $z = 1$, пространственная группа $P3m1$ [12]. Для измерения электрических характеристик из пластинок монокристаллов толщиной $\sim 300 \mu m$ путем нанесения серебряной пасты были изготовлены конденсаторы. Измерения сопротивления проводились с помощью цифровых измерителей иммитанса E7-20 (частоты 25– 10^6 Hz). На образец подавалось измерительное напряжение 1 V.

На рис. 1 приведены зависимости проводимости от частоты для монокристаллов $MnGaInSe_4$. Видно, что электропроводность при исследуемых температурах сначала в области низких частот ($3 \cdot 10^3$ – $1.2 \cdot 10^4$ Hz) остается

постоянной, а затем с ростом частоты ($2 \cdot 10^4$ – 10^6 Hz) увеличивается.

Для монокристаллов $MnGaInSe_4$ в интервале частот $2 \cdot 10^4$ – 10^6 Hz с увеличением частоты электропроводность растет по закону

$$\sigma \sim f^S (0.1 \leq S \leq 1.0). \quad (1)$$

При низких температурах (295.5–323 К) в интервале частот $2 \cdot 10^4$ – 10^6 Hz S имеет значение 0.085–0.31, а в температурном интервале 343–360 К при тех же частотах S изменяется в диапазоне 0.069–0.37. Видно, что при высоких температурах значение S для исследуемых частот изменяется больше, чем при низких. В монокристаллах $MnGaInSe_4$ механизм зависимости

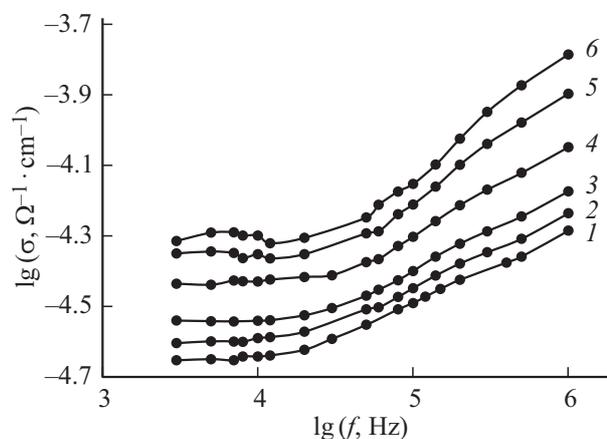


Рис. 1. Зависимости электропроводности от частоты измерений при различных температурах. T , К: 1 — 295.5, 2 — 301, 3 — 308, 4 — 323, 5 — 343, 6 — 360.

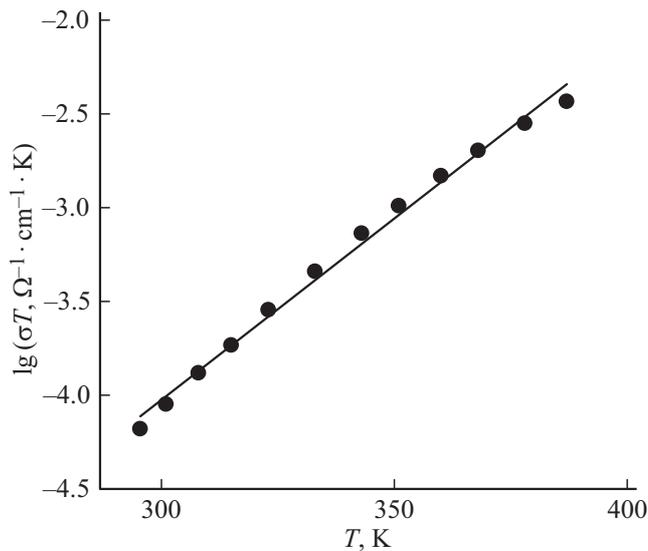


Рис. 2. Зависимость $\ln(\sigma T) \sim f(T)$ для монокристаллов MnGaInSe_4 при 10^6 Hz.

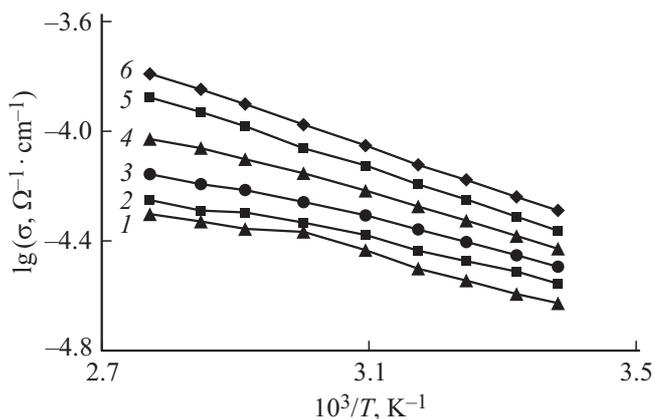


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности для монокристаллов MnGaInSe_4 на переменном токе при различных значениях частоты. f , Hz: 1 — 10^4 , 2 — $5 \cdot 10^4$, 3 — 10^5 , 4 — $2 \cdot 10^5$, 5 — $5 \cdot 10^5$, 6 — 10^6 .

роста электропроводности от частоты можно объяснить следующим образом. Известно, что если в кристаллах и аморфных полупроводниках зависимость изменения электропроводности от частоты будет подчиняться закономерности $\sigma(\omega) \sim \omega^S$ ($0.1 \leq S \leq 1.0$), то можно предполагать, что существует прыжковый механизм проводимости [13]. На основе дебаевского анализа частотной зависимости проводимости в [13] были теоретически исследованы частотная и температурная зависимости проводимости. В указанной работе установлена следующая частотная зависимость проводимости:

$$\sigma(\omega)_T \sim \omega \left\{ \ln \left(\frac{\nu_f}{\omega} \right) \right\}^4 \sim \omega^S, \quad S \leq 1, \quad (2)$$

а температурная зависимость проводимости определяется как

$$\sigma(T)_\omega \sim T^{-1} \exp\left(\frac{T}{T_0}\right), \quad (3)$$

где ν_f — частота фонона, T_0 — характеристическая температура. Согласно (3), при изложенном выше механизме проводимости при температурах выше $T > T_0$ температурная зависимость электропроводности в масштабах $\ln(\sigma T) \sim f(T)$ должна давать прямую линию. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость $\ln(\sigma T) \sim f(T)$ при частоте 10^6 Hz. Из рисунка видно, что зависимость прямолинейная. Этому соответствует прыжковый механизм проводимости. Отметим, что соединение типа AB_2X_4 обладает некоторыми свойствами (например, эффект переключения, токи неустойчивости и т. д.), которые характерны для аморфных тел [14]. Установлено также, что эти кристаллы являются компенсированными полупроводниками [15]. Кроме того, эти системы можно рассматривать как беспорядочные. Поэтому в монокристалле MnGaInSe_4 использование прыжкового механизма для описания проводимости естественно. В беспорядочных системах проблемы прыжковой проводимости в некоторых работах рассматриваются с точки зрения кластерного приближения [16,17]. В монокристаллах MnGaInSe_4 изменение электропроводности в зависимости от частоты можно объяснить при помощи мультиплетной модели [18], так как в кристаллах существуют кластеры, содержащие локализованные состояния с близкой энергией, и перескок электронов осуществляется между ними. С повышением частоты сначала одни, а затем другие заряженные частицы не успевают за время четверти периода приложенного напряжения достигнуть мест локализации и, непрерывно следуя за изменением электрического поля, вносят вклад уже в проводимость.

На рис. 3 приведены температурные зависимости электропроводности монокристаллов MnGaInSe_4 на переменном токе при различных значениях частоты. В исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом, при этом проводимость описывается соотношением [13]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT), \quad (4)$$

где ΔE — энергия активации, k — постоянная Больцмана. Видно, что при высоких частотах (линии 5 и 6) на зависимости $\lg \sigma$ от $1/T$ выявляется один линейный участок. По наклону этой зависимости определена энергия активации, значение которой равно 0.16 eV. В интервале частот 10^4 – $2 \cdot 10^5$ Hz (линии 1–4) зависимость $\lg \sigma \sim 10^3/T$ состоит из двух прямых с различными наклонами. По наклонам этих зависимостей определены энергии активации, значения которых в низкотемпературной области почти одинаковые — 0.14 eV, а в высокотемпературной области изменяются в интервале 0.056–0.11 eV. Из этого следует, что величина энергии активации есть функция частоты. Зависимость энергии

активации от частоты можно объяснить с помощью прыжкового механизма [13]. Также, согласно (4), видно, что в монокристаллах $MnGaInSe_4$ температурная зависимость электропроводности обладает активационным характером, а значит, в соединении $MnGaInSe_4$ проводимость характеризуется зонно-прыжковыми механизмами.

Таким образом, в работе приведены результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности монокристаллов $MnGaInSe_4$ на переменном электрическом токе. Установлено, что при исследуемых температурах в интервале частот $2 \cdot 10^4 - 10^6$ Hz для электропроводности выполняется закономерность $\sigma \sim f^S$ ($0.1 \leq S \leq 1.0$). В $MnGaInSe_4$ изменение электропроводности в зависимости от частоты можно объяснить при помощи мультиплетной модели, так как в монокристаллах существуют кластеры, содержащие локализованные состояния с близкой энергией, и перескок электронов осуществляется между ними. На основе зависимостей $\lg \sigma \sim 10^3/T$ определены энергии активации. В монокристаллах $MnGaInSe_4$ проводимость характеризуется зонно-прыжковым механизмом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Hwang Y, Choi J, Ha Y, Cho S, Park H. // *Current Appl. Phys.* 2020. V. 20. N 1. P. 212–218.
- [2] Myoung B.R., Lim J.T., Kim C.S. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 438. P. 121–125.
- [3] Боднарь И.В., Детков С.А., Касюк Ю.В., Федотова Ю.А. // *ФТП.* 2018. Т. 52. В. 10. С. 1203–1206.
- [4] Kennedy A., Senthil Kumar V., Pradeev Raj K. // *Mater. Lett.* 2017. V. 195. P. 96–99.
- [5] Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б., Мурадов М.Б., Мамедов Ф.М. // *ЖТФ.* 2012. Т. 82. В. 4. С. 147–149.
- [6] Боднарь И.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Теруков Е.И. // *ФТП.* 2010. Т. 44. В. 1. С. 39–43.
- [7] Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б., Мурадов М.Б., Мамедов Ф.М., Казымова Ф.А. // *Письма в ЖТФ.* 2009. Т. 35. В. 22. С. 79–83.
- [8] Sagredo V., Moron M., Betancourt L., Delgado G. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2007. V. 312. N 2. P. 294–297.
- [9] Torres T., Sagredo V., De Chalbaud L., Attolini G., Bolzoni F. // *Physica B.* 2006. V. 384. N 1-2. P. 100–102.
- [10] Lei S., Tang K., Fang Z., Qi Y., Zheng H. // *Mater. Res. Bull.* 2006. V. 41. N 12. P. 2325–2333.
- [11] Mammadov F.M., Aliyeva M.Kh., Amiraslanov I.R., Niftiyev N.N. // *Azerb. Chem. J.* 2017. N 4. P. 69–72.
- [12] Batistony C., Gastaldi L., Mattogno G., Simeone M.G., Viticoli S. // *Solid State Commun.* 1987. V. 61. N 1. P. 43–46.
- [13] Мотт Н., Дэвис Э. *Электронные процессы в некристаллических веществах.* М.: Мир, 1982. Т. 1. 368 с.
- [14] Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б., Мурадов М.Б., Алиджанов М.А. // *УФЖ.* 2002. Т. 47. № 11. С. 1054–1056.
- [15] Нифтиев Н.Н. // *ФТП.* 2004. Т. 38. В. 2. С. 166–167.
- [16] Böttger H., Bruksin V.V. // *Phys. Status Solidi B.* 1982. V. 113. N 1. P. 9–49.
- [17] Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. *Электронные свойства легированных полупроводников.* М.: Наука, 1979. 416 с.
- [18] Брыксин В.В. // *ФТТ.* 1980. Т. 22. В. 8. С. 2441–2449.