

## БЕЗАКТИВАЦИОННАЯ ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СЛОИСТЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ $TlInS_2$

С.Н. МУСТАФАЕВА

*Институт физики НАН Азербайджана  
AZ 1143 Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Установлено, что при температурах  $T \leq 200K$  в слоистых монокристаллах  $TlInS_2$  как вдоль, так и поперек их естественных слоев в постоянном электрическом поле имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. В области температур  $110 \div 140K$  в монокристаллах  $TlInS_2$  установлено наличие безактивационной прыжковой проводимости. Оценены расстояния прыжков в области безактивационной прыжковой проводимости  $R = 275 \text{ \AA}$  и перепад потенциальной энергии носителей заряда на длине прыжка  $R$  в электрическом поле  $F$ :  $eFR = (3,3 \div 7,4) \cdot 10^{-3} \text{ \text{эВ}}$ .

Слоистые монокристаллы  $TlInS_2$  являются высокоомными полупроводниками ( $\rho = 10^{10} \div 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при  $T = 293K$ ), характеризуются малой концентрацией свободных носителей заряда в разрешенной зоне и высокой плотностью состояний в запрещенной зоне ( $E_g = 2,5 \text{ \text{эВ}}$  при  $293K$ ) [1–3]. В [2] изучена прыжковая проводимость в монокристаллах  $TlInS_2$  на переменном токе.

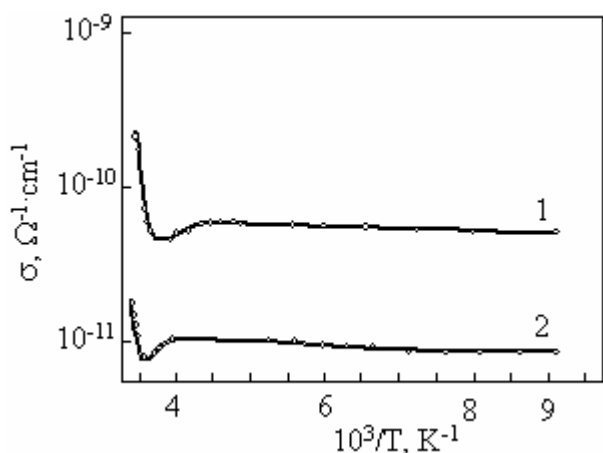
Целью настоящей работы явилось установление механизма проводимости в монокристаллах  $TlInS_2$  на постоянном токе при  $T < 300K$ .

Как известно, в полупроводниках с высокой плотностью локализованных состояний вблизи уровня Ферми в постоянном электрическом поле при низких температурах наблюдается прыжковая проводимость по запрещенной зоне, которая доминирует над проводимостью, обусловленной термовозбужденными носителями заряда в разрешенной зоне.

Ниже приведены результаты изучения процессов переноса заряда в слоистых монокристаллах  $TlInS_2$  в постоянном электрическом поле и при низких температурах. Проводимость образцов определяли как вдоль ( $\sigma_{\perp C}$ ), так и поперек ( $\sigma_{\parallel C}$ ) слоев кристаллов. Контактным материалом при изготовлении образцов в двух конфигурациях служил вплавленный индий, который обеспечивал омический контакт с  $TlInS_2$ . Образцы для измерений имели толщину порядка  $80 \div 130 \text{ мкм}$ . Напряженность постоянного электрического поля, приложенного к образцам, составляла  $(1,2 \div 2,7) 10^3 \text{ В/см}$  для разных образцов. Проводимость образцов была измерена в области температур  $110 \div 296K$ . Образцы в процессе измерений помещались в гелиевый криостат марки «УТРЕКС» с системой стабилизации температуры (точность стабилизации  $0,02K$ ).

На Рис.1 приведены температурные зависимости  $\sigma_{\perp C}$  (кривая 1) и  $\sigma_{\parallel C}$  (кривая 2) для монокристалла  $TlInS_2$ . Высокотемпературные ветви этих зависимостей носили экспоненциальный характер и имели наклон  $\sim 0,4 \text{ \text{эВ}}$ . После экспоненциального спада проводимости  $\sigma_{\perp C}$  и  $\sigma_{\parallel C}$  начинали увеличиваться и в области температур  $\sim 220K$  проходили через максимум. Такой аномальный ход  $\sigma_{\perp C}$  и  $\sigma_{\parallel C}$  обусловлен, вероятно, фазовым переходом. Наличие в монокристаллах  $TlInS_2$  фазового перехода в несоизмерную фазу при  $T = 220K$  установлено также и в [4,5]. После максимума вплоть до  $T = 140K$  наблюдался очень медленный спад  $\sigma_{\perp C}$  и  $\sigma_{\parallel C}$ , характеризующийся монотонно убывающей с температурой энергией активации проводимости. Этот факт позволяет утверждать, что в области температур  $(140 \div 200)K$  перенос заряда вдоль и поперек слоев монокристалла

$TlInS_2$  осуществляется с помощью прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка по состояниям, лежащим в узкой полосе энергий ( $\Delta E$ ) вблизи уровня Ферми [6]. Примерное значение энергии активации  $\Delta E$  в этой области температур составляло менее  $10^{-2}$ эВ, а в области температур  $110 \div 140$ К  $\sigma_{\perp C}$  и  $\sigma_{\parallel C}$  вообще переставали зависеть от температуры.



Независящая от температуры проводимость может быть объяснена туннельным переходом носителей заряда в сильном электрическом поле из локализованных состояний в разрешенную зону.

**Рис.1.**

Температурные зависимости  $\sigma_{\perp C}$  (кривая 1) и  $\sigma_{\parallel C}$  (кривая 2) для монокристалла  $TlInS_2$ .

В нашем случае экспериментальные данные (относительно слабые поля  $F=2,7 \cdot 10^3$ В/см, удаленность от поля пробоя) позволяют утверждать, что безактивационная проводимость в монокристаллах  $TlInS_2$  в области температур  $110 \div 140$ К осуществляется локализованными носителями заряда, т.е. является по существу прыжковой проводимостью. Для наблюдения такой проводимости необходимо, чтобы на длине характерного прыжка  $R$  перепад потенциальной энергии  $eFR$  носителей заряда в электрическом поле  $F$  был сравним с величиной разброса энергии  $\Delta E$  локализованных центров вокруг уровня Ферми, где происходят прыжки. При этом носители заряда могут двигаться в направлении поля, испуская фононы при каждом перескоке [7]. Зная, что в  $TlInS_2$  плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми  $N_F=6,5 \cdot 10^{18}$ эВ $^{-1}$ см $^{-3}$  [2], мы оценили длину прыжков носителей заряда на постоянном токе по формуле [7]:

$$R(F) = \alpha^{1/4} (N_F e F)^{-1/4}, \quad (1)$$

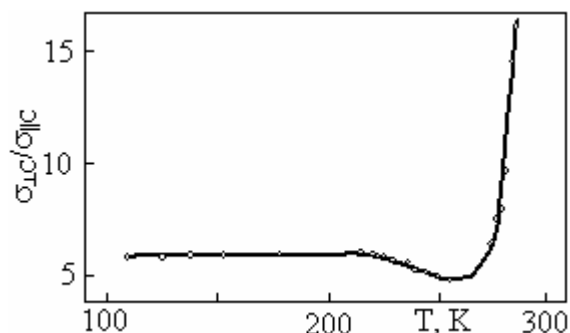
где  $\alpha$  - численный множитель порядка 1. При  $F=2,7 \cdot 10^3$  В/см  $R(F)$  было равно  $275 \text{ \AA}$  (средняя длина прыжка в  $TlInS_2$  на переменном токе при  $T=293$ К составляла  $117 \text{ \AA}$  [2]). Наши оценки показали, что в исследованной области электрических полей  $F=(1,2 \div 2,7) \cdot 10^3$  В/см  $eFR=(3,3 \div 7,4) \cdot 10^{-3}$ эВ, т.е. это значение сравнимо с шириной полосы энергий вблизи уровня Ферми  $\Delta E$ , примерное значение которой мы оценили по наклону зависимости  $\lg \sigma$  от  $10^3/T$  при низких температурах ( $\Delta E < 10^{-2}$ эВ). Величина разброса энергии  $\Delta E$  вблизи уровня Ферми оценена нами также из условия [6]:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 N_F \frac{\Delta E}{2} = 1, \quad (2)$$

при этом для  $\Delta E$  было получено значение  $3,5 \cdot 10^{-3}$ эВ. Выполнение в наших экспериментах условия  $eFR \geq \Delta E$  подтверждает тот факт, что безактивационная проводимость при температурах  $T \leq 140$ К обусловлена переносом локализованных носителей заряда по запрещенной зоне монокристаллов  $TlInS_2$ .

Интересным экспериментальным фактом является то, что в диапазоне температур  $110 \div 200$ К, в котором в монокристаллах  $TlInS_2$  имеет место прыжковая проводимость, степень анизотропии проводимости  $\sigma_{\perp C}/\sigma_{\parallel C}$  почти не зависит от температуры (Рис.2), а в области температур  $260 \div 290$ К  $\sigma_{\perp C}/\sigma_{\parallel C}$  резко растет

(примерно в 3 раза), однако, оставаясь по величине намного меньшей, чем в кристаллах  $TlGaSe_2$  [8] и  $TlGaS_2$  [9].



**Рис.2.**  
Температурная зависимость степени анизотропии проводимости в монокристалле  $TlInS_2$ .

Итак, полученные экспериментальные результаты показали, что при температурах  $T \leq 200K$  вдоль и поперек слоев монокристаллов  $TlInS_2$  имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка, которая при  $T \leq 140K$  становится безактивационной.

1. С.Н.Мустафаева, М.М.Асадов, *В кн.: Неоднородные электронные состояния. Новосибирск, ИНХ СО АН СССР, (1991) 198.*
2. С.Н.Мустафаева, М.М.Асадов, В.А.Рамазанзаде, *ФТТ, 38 (1996) 14.*
3. С.Н.Мустафаева, М.М.Асадов, В.А.Рамазанзаде, *Неорган.материалы, 31 (1995) 318.*
4. С.Б.Вахрушев, В.В.Жданова, Б.Е.Квятковский, Н.М.Окунева, К.Р.Аллахвердиев, Р.А.Алиев, Р.М.Сардарлы, *Письма в ЖЭТФ, 39 (1984) 24.*
5. К.Р.Аллахвердиев, Н.А.Бахышов, Т.Г.Мамедов, А.И.Наджафов, *ФТТ, 28 (1986) 2243.*
6. Н.Мотт, Э.Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах, Мир, Москва, (1974).*
7. Б.И.Шкловский, *ФТП, 6 (1972) 2335.*
8. С.Н.Мустафаева, В.А.Алиев, М.М.Асадов, *ФТТ, 40 (1998) 48.*
9. С.Н.Мустафаева, В.А.Алиев, *Fizika, 3 (1997) 27.*

### LAYLI $TlInS_2$ MONOKRİSTALINDA AKTİVLƏŞMƏMİŞ HOPPANMA TIPLİ KEÇİRİSİLİK

S.N.MUSTAFAYEVA

Sabit elektrik sahəsində,  $T \leq 200 K$  temperaturunda laylı  $TlInS_2$  monokristalında layların həm eninə, həm də uzununa istiqamətlərində hoppanma tipli keçiricilik müəyyən olunmuşdur. Hoppanma tipli keçiricilik, monokristalın Fermi səviyyəsinin yaxınlığındakı lokalizə olunmuş enerji səviyyələrində, hoppanmaların uzunluğunun dəyişməsi ilə baş verir.

Laylı  $TlInS_2$  monokristalında 110÷140K temperatur intervalında aktivləşməmiş hoppanma tipli keçiricilik müəyyən edilmişdir. Aktivləşməmiş hoppanma tipli keçiricilik sahəsində hoppanmaların uzunluğu  $R=275E$  və hoppanmaların  $R$  uzunluğuna uyğun olan yükdaşıyıcıların potensial enerjilərinin dəyişilməsi [ $eFR=(3,3 \div 7,4) \cdot 10^{-3} eV$ ] qiymətləri  $F$  elektrik sahəsində təyin edilmişdir.

### NONACTIVATED HOPPING CONDUCTIVITY IN LAYER $TlInS_2$ SINGLE CRYSTALS

S.N.MUSTAFAYEVA

It was shown that at temperatures  $T \leq 200K$  hopping dc-conductivity at Fermi level takes place along ( $\sigma_{\perp c}$ ) and across ( $\sigma_{\parallel c}$ ) the layers in  $TlInS_2$  single crystals.

Presence of non-activated hopping conductivity was established in  $TlInS_2$  single crystals in (110÷140)K temperature range. Hopping distance  $R=275\text{\AA}$  and potential-energy-change of current carriers at hopping distance  $R$  in electrical field  $F$ :  $eFR=(3.3 \div 7.4) \cdot 10^{-3} eV$  were evaluated.

Редактор: Г.Аждаров