

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $TlInSe_2$

Р.С.МАДАТОВ, А.И.НАДЖАФОВ, Т.БТАГИЕВ, М.Р.ГАЗАНФАРОВ

*Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана  
AZ 1143, Г.Баку, Ф.Агаева, 9*

Исследованы температурные зависимости вольт-амперной характеристики, фотопроводимости и электропроводности монокристаллов  $TlInSe_2$ . Установлено, что механизм токопрохождения в монокристаллах  $TlInSe_2$  при полях  $E < 10^2$  В/см обусловлен током, ограниченным пространственным зарядом, а при  $E > 10^2$  В/см обусловлен полевым эффектом. Показано, что перезарядка г-центров при освещении белым светом  $TlInSe_2$  приводит к температурному гашению фототока при 180К.

Селеноиндат таллия  $TlInSe_2$  относится к группе низкомерных полупроводниковых соединений, обладающих цепочечной структурой и их полупроводниковые свойства объясняются на основе модели химической связи и Пирсона [1-3]. Возросший в последние годы интерес исследователей к этим материалам обусловлен сильной анизотропией физических свойств, а также наличием высокой фотопроводимости в этих кристаллах. Кристаллы  $TlInSe_2$  перспективны для создания на их основе детекторов и приемников излучения, а также функциональных устройств, управляемых электрическим полем, работающих в условиях жесткой радиации [9, 10].

Интересным представителем таких полупроводниковых соединений является  $TlInSe_2$ , который кристаллизуется в тетрагональной решетке типа  $TlSe$  (пространственная группа симметрии  $I4/mcm$ ) [4-8]. Атомы  $Tl$  и  $In$  в структуре занимают два независимые положения и соответственно имеют разные координационные числа:  $Tl^+$  находится в октаэдрическом, а  $In^{3+}$  – в тетраэдрическом окружении атомов халькогена [7-9].

Представляется интересным выяснение механизма токопрохождения в нитевых монокристаллах  $TlInSe_2$  при различных температурах и электрических полях.

Монокристаллы выращивались методом направленной кристаллизации, описанным в работе [11]. Монокристаллы имели тетрагональную структуру (параметры решетки:  $a=8,061\text{Å}$ ,  $c=6,822\text{Å}$ ), обладали  $p$ -типом проводимости с концентрацией дырок  $2,5 \cdot 10^{11} \text{см}^{-3}$ . Поверхности кристаллов  $TlInSe_2$  были зеркально-гладкими, что позволило использовать их для исследований без какой-либо дополнительной обработки. Омические контакты к кристаллам наносились плавлением индия к торцам образцов. Площадь электродов составляла  $0,2-0,3 \text{мм}^2$ , а расстояние между ними равнялось  $0,2 \div 0,4 \text{мм}$ . Были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ), электропроводимость и фотопроводимость в интервалах электрических полей  $20 \div 10^4 \text{В/см}$  и температур  $120 \div 300 \text{К}$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На Рис.1 приведены вольт-амперные характеристики монокристалла  $TlInSe_2$  при различных температурах и освещенностях. Как следует из Рис.1, в ВАХ темнового тока при температурах  $120 \div 300 \text{К}$  отчетливо видны линейные и сверхлинейные участки зависимости  $I \sim U^n$ , где  $n=0,9-5,0$  характерные для режима тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ). Первый участок соответствует закону Ома и с увеличением температуры величина переходного напряжения перемещается к меньшим значениям напряжений.

На втором участке наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения ( $n=2$ ). На третьем участке ток экспоненциально растет с напряжением в степени  $n>2$ , причем с увеличением температуры уменьшается от 5 ( $T=120\text{K}$ ) до 4 ( $T=300\text{K}$ ). Как видно из Рис.1, протяженность линейного участка при  $5\div 70\text{V}$  ( $T=120\text{K}$ ), где выполняется закон Ома, оказывается значительно большей по сравнению с имеющими место при  $T=300\text{K}$ . Это, по-видимому, связано с увеличением концентрации равновесных носителей по мере роста температуры (до  $T=300\text{K}$ ). Следует отметить тот факт, что с ростом температуры квадратичная область постепенно перекрывается I и III участками. Квадратичный участок ВАХ исчезает также при воздействии на исследуемые образцы собственного или же белого света (Рис.1). При больших освещенностях ВАХ  $\text{TlInSe}_2$  состоит из начального линейного и экспоненциального участков.

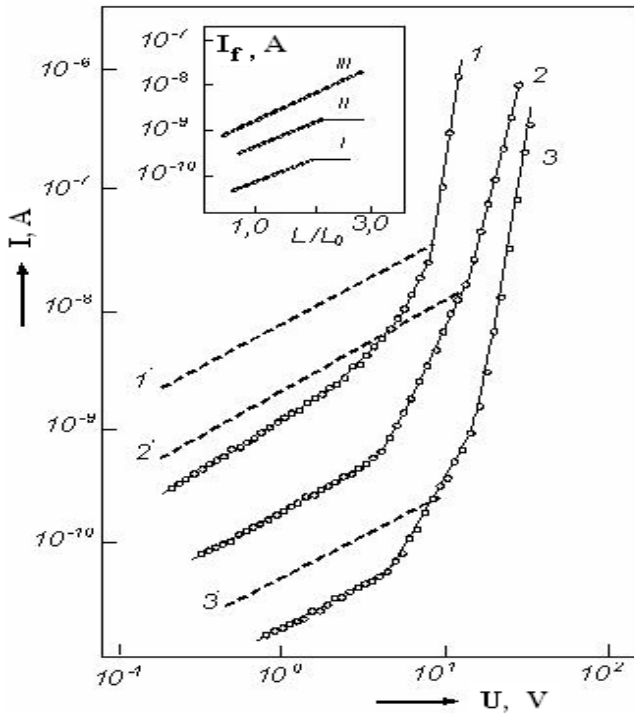


Рис.1.

ВАХ монокристалла  $\text{TlInSe}_2$  при температурах: 1-300, 2-200, 3-120K; 1\*, 2\* и 3\*-при освещении (вверху – зависимость фототока от освещенности при 1-120, 2-200 и 3-300K).

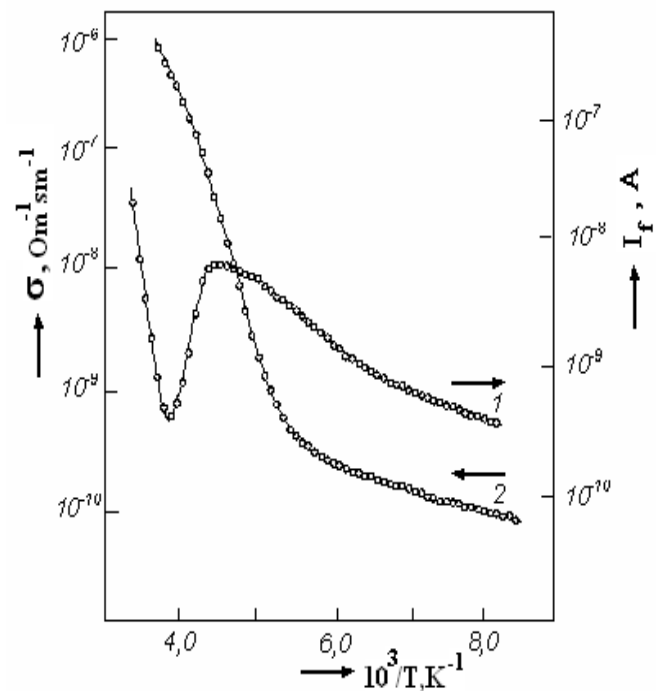


Рис.2.

Температурные зависимости электропроводности (2) и фототока (1) для монокристалла  $\text{TlInSe}_2$ .

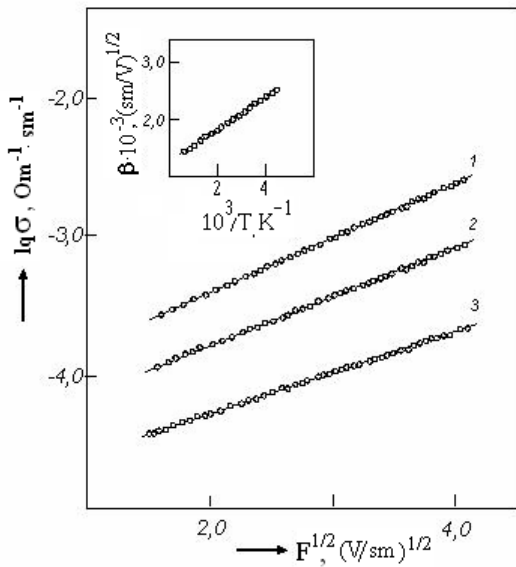
Используя [12], нами вычислены концентрация ловушек и фактор захвата, которые оказались соответственно равны  $N_t \approx 2,5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$  и  $\theta \approx 2 \cdot 10^{-6}$  при комнатной температуре. Концентрация носителей и энергия активации, вычисленные из температурной зависимости  $\theta$ , с учетом  $\mu$  [10], оказались равны  $n_t = 2 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$  и  $\Delta E_t = 0,45 \text{eV}$ , соответственно.

ВАХ, измеренная при различных температурах, зависимость плотности тока от межэлектродных расстояний для квадратичной и экспоненциальной областей, а также зависимость  $\theta$  (доля свободных носителей) от температуры в интервале электрических полей  $10^{-1} \div 10^2 \text{V/cm}$  обусловлена монополярной инжекцией.

На Рис.2 (кр.2) показана температурная зависимость  $\sigma \sim f(10^3/T)$ , вычисленная в омической области ВАХ, состоящая из двух прямых с различными наклонами. Энергии активации уровней в монокристаллах  $\text{TlInSe}_2$ , определенные по этим наклонам, соответственно равны: 0,15 и 0,50eV.

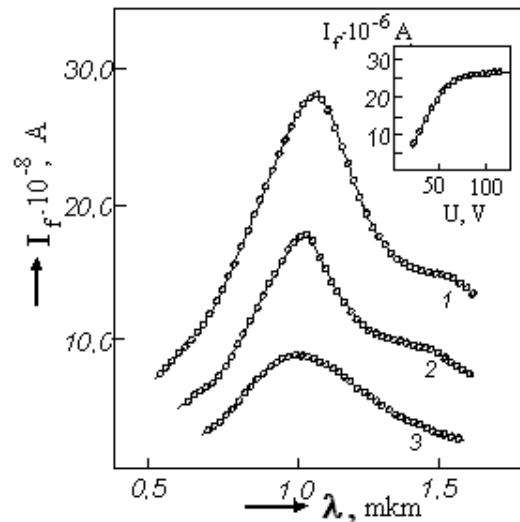
Температурная зависимость фототока при различных электрических полях показана на Рис.2 (кр.1). Как видно из Рис.2 фототок экспоненциально увеличивается в интервале 120÷170К с ростом температуры при электрическом поле  $E=10^2\text{V/cm}$ . Однако с дальнейшим увеличением температуры в интервале 170÷180К наблюдается температурное гашения фототока и ростом электрического поля ( $E>10^3\text{V/cm}$ ) глубина гашения фототока постепенно уменьшается. В области температур  $T>170\text{K}$  наблюдается ТГФ в связи с развитием термической генерации электронов из  $r$ -уровней в  $c$ -зону и последующим захватом их на  $s$ -уровни. При понижении температуры ниже 170К значения фототока уменьшаются, что, по-видимому, указывает на локализацию дырок на  $t$ -уровнях и соответственно электронов на  $r$ -уровнях рекомбинации. В результате образования  $N_r=N_t$ , согласно [14], происходит уменьшение времени жизни дырок и фототока.

На Рис.3 для области резкого роста тока представлены зависимости электропроводности от электрического поля ( $10^3\div 10^4\text{V/cm}$ ) при различных температурах в координатах  $\lg \sigma \sim f(\sqrt{F})$ . По наклону прямых были определены значения  $\beta$  ( $\beta$ -коэффициент Френкеля) при различных температурах. Температурная зависимость  $\beta$ , определенная из зависимости  $\lg \sigma \sim f(\sqrt{F})$  при различных температурах, приведена на вставке к Рис.3. Как видно из рисунка, с уменьшением температуры наблюдается линейный рост значений  $\beta$ . Такое температурное поведение  $\beta$  согласуется с теорией Френкеля. По экспериментальным значениям  $\beta$  сделана оценка диэлектрической проницаемости исследованных монокристаллов, где  $\epsilon_0 \cong 10$ , которое согласуется с литературными данными [10]. Согласно [13], оценена концентрация ионизованных дефектов, ответственных за термополевую ионизацию центров с учетом минимального значения электрического поля, с которого начинается нелинейная зависимость  $\sigma(F)$  для кристаллов  $\text{TlInSe}_2$ . Получено значение  $N_t = 2.1 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$ .



**Рис.3.**

Зависимость  $\lg \sigma$  от  $\sqrt{F}$  для монокристалла  $\text{TlInSe}_2$  при температурах: 1-300, 2-200, 3-120К; (вверху - температурная зависимость коэффициента Френкеля).



**Рис.4.**

Спектральное распределение фототока в монокристаллах при различных электрических полях: 1 - 50 , 2 -  $3 \cdot 10^2$  и 3 -  $1,7 \cdot 10^3\text{V/cm}$  (вверху зависимость фототока от приложенного напряжения).

На Рис.4 приведено спектральное распределение фототока в монокристаллах  $\text{TlInSe}_2$  при различных электрических полях при комнатной температуре. Видно, что спектр фотопроводимости  $\text{TlInSe}_2$  охватывает область длин волн  $0,4 \div 1,6 \mu\text{м}$  и имеет интенсивный максимум при  $\lambda = 1,1 \mu\text{м}$ . Следует отметить, что положение максимума фотопроводимости не зависит от напряженности электрического поля, в тоже время, рост электрического поля приводит к экспоненциальному увеличению величины фототока и полуширины максимума фотопроводимости (Рис.3). В длинноволновой области спектра наблюдается мелкий максимум при  $\lambda = 1,3 \mu\text{м}$ , величина которого уменьшается с ростом электрического поля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно [14], причины нелинейного хода ВАХ в сложных полупроводниках однозначно не установлены. Возможной причиной нелинейности ВАХ в  $\text{TlInSe}_2$  могут служить механизмы, известные как ток, ограниченный объемным зарядом и ионизация центров при сильных электрических полях [12,14]. Согласно [12], при приложении напряжения к высокоомному образцу в цепи возникает ток, обусловленный инжекцией носителей заряда из металлического электрода, который описывается  $I \sim E^2$ . Нелинейный участок ВАХ в высокоомных кристаллах, содержащих мелкие и глубокие ловушки, связывался с реализацией монополярной или двойной инжекции.

С учетом вышесказанного и, применяя формулы  $\Delta F = kT \ln U_m / U_{1-2}$  [12], где  $U_m$  – наибольшее значение напряжения,  $U_{1-2}$  – напряжение перехода от линейного к квадратичному, оценено смещение квазиуровня Ферми, а также полная концентрация ловушек ( $N_t$ ) в исследуемых кристаллах  $\text{TlInSe}_2$ , вызванных накоплением объемного заряда за счет инжектированных носителей тока на ловушках. Оказалось, что величина  $\Delta F$  и  $N_t$  составляют  $\sim 0,13 \text{эВ}$  и  $4,0 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$ , соответственно.

Наличие в кристаллах  $\text{TlInSe}_2$   $r$ - (медленные) и  $s$ - (быстрые) центров рекомбинации, а также  $t$ -уровня прилипания ( $E = 0,50$  и  $0,15 \text{эВ}$ ) позволяет предположить, что в при полях  $I \sim E^2$  в ВАХ осуществляется ловушечный характер проводимости. Полученные расчетные и экспериментальные данные в квадратичной области ВАХ ( $j \sim L^{-3}$ , где  $L$  – толщина образца,  $\theta \approx 2 \cdot 10^{-6}$ ) показывают, что в монокристаллах  $\text{TlInSe}_2$  перенос носителей заряда в электрических полях ( $E < 10^2 \text{В/см}$ ) обусловлен монополярной инжекцией и согласуется с теорией Ламперта. При этом учитывается, что при температурах  $T > 250 \text{К}$  и освещенностях за счет увеличения концентрации избыточных носителей условия ТОПЗ не реализуются и выполняется условие  $n_t \geq n_o$  [12] ( $n_t = 2 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$ ,  $n_o = 2 \cdot 10^{11} \text{см}^{-3}$ ). Однако уменьшение значения напряжения перехода от омического участка к квадратичному с ростом температуры указывает, что в исследуемых монокристаллах имеется слабая компенсации. Это доказывает, что в исследуемом интервале температур темновые заполнения центров, определяемые положением равновесного уровня Ферми, зависят от расположения и суммарной концентрация центров [14].

Сравнение температурных зависимостей фототока показывает, что в интервале  $120 \div 170 \text{К}$  наблюдается термоактивация фототока, которая обусловлена присутствием центров прилипания ( $t$ -центров,  $\Delta E_t = 0,10 \div 0,15 \text{эВ}$  и  $r$ -центров,  $\Delta E_r = 0,45 \div 0,50 \text{эВ}$ ) для неосновных носителей. Температурное гашение фототока в области  $180 \div 200 \text{К}$  происходит в результате интенсивного обмена носителей между  $r$ -центром и  $v$ -зоной. Так как этот фактор является определяющим во многих электрических и фотоэлектрических процессах, протекающих в объеме полупроводника при различных внешних воздействиях.

Анализ полученных экспериментальных данных при  $E > 10^2 \text{V/cm}$  показывает, что увеличение проводимости с ростом напряженности электрического поля ( $E > 10^2 \text{V/cm}$ ) связано с ростом концентрации избыточных носителей тока. Это позволяет нам предполагать, что наличие участка более резкого роста тока в ВАХ, где  $n > 3$  можно объяснить тем, что в кристаллах  $\text{TlInSe}_2$  при электрических полях  $E > 10^2 \text{V/cm}$  имеет место полевая ионизации ловушек. Это предсказывается теорией Френкеля, согласно которой при ионизации центров энергия активации носителей тока уменьшается с ростом поля на величину  $2e(eE/\epsilon)^{1/2}$ . Линейная температурная зависимость коэффициента  $\beta \sim 1/T$ , определенная из зависимости  $\lg \sigma \sim f(\sqrt{F})$  при различных температурах (Рис.3), указывает на применимость теории Френкеля для объяснения полученных данных.

С использованием экспериментальных данных и согласно [14], определена глубина потенциальной ямы обнаруженных центров, а также вычислена длина свободного пробега носителей тока. При этом длина свободного пробега в кристаллах  $\text{TlInSe}_2$  составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{cm}$ . Полученные данные позволяют предположить, что в электрических полях более  $10^3 \text{V/cm}$  выполняется условия [14] для полевой ионизации ловушек.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования вольтамперных характеристик и электропроводности в монокристаллах  $\text{TlInSe}_2$  показывают, что механизм токопрохождения при полях  $E < 10^2 \text{V/cm}$  обусловлен током, ограниченным пространственным зарядом, а при  $E > 10^2 \text{V/cm}$  обусловлен полевым эффектом. Существование локализованных центров в запрещенной зоне, которые значительно влияют на электрические и фотоэлектрические свойства, обусловлено наличием структурных дефектов и неконтролируемых примесей в выращенных кристаллах  $\text{TlInSe}_2$ . Сделаны оценки основных параметров проводимости: концентрации носителей тока, полной концентрации ловушек, диэлектрической проницаемости, энергии смещения уровня Ферми и активации уровней. Установлено, что кристаллы  $\text{TlInSe}_2$  являются частично компенсированными полупроводниками.

1. D.Muller, G.Eulenberger, H.Hahn, *Z. Anorg. Allg. Chemie*, **398** (1973) 207.
2. G.Guseinov, A.M.Ramanzade, E.M.Kerimova, and M.Z.Ismailov, *Phys. Stat. Sol.*, **22** (1967) K117.
3. E.Mooser, W. Pirson, *J.Elektron*, **1** (1956) 629.
4. Б.Ф.Ормонт, *Структуры неорганических веществ. ГИТТЛ.М.Л.*, (1950).
5. G.D.Guseinov, G.B.Abdullaev, S.M.Bidzinova, M.Z.Ismailov, F.M.Seidov, A.M.Pashaev, *Phys.Lett.*, **33A** (1970) 421.
6. S.Bradtmuller, R.Kremer, P. Buttcher, *Anorg. Allg. Chem.*, **620** (1994) 1073.
7. S.Kashida, K.Nakamura, S.Katayama, *Sol. Stat. Commun.*, **82** (1992) 127.
8. K.Nakamura, S.Kashida, *J.Soc.Japan*, **62** (1993) 3135.
9. Н.М.Гасанлы, Б.М.Джавадов, В.И.Тагиров, Б.Н.Маврин, *Изв. Вуз. СССР, сер. Физика*, **3** (1979) 104.
10. E.Kerimova, S.Mustafaeva, D.Guseinova, I.Efendieva, T.Mamedov, S.Babaev, E.Salaeva, K.Allkhverdiev, *Phys. Stat.Solid.*, **179** (2000) 199.
11. С.Н.Алиев, А.Н.Наджафов, О.З.Алекперов, *ФТП*, **27** (1991) 621
12. М.Ламперт, П.Марк, *Инжекционные токи в твердых телах. Мир, М.*, (1973).
13. Я.И.Френкель, *Сб.изб.трудов, М., Л.*, **2** (1958) 217.
14. В.Е.Лашкарев, А.В.Любченко, М.К.Шейкман, *Неравновесные процессы в фотопроводниках, Д. К.* (1981).

**R.S.MƏDƏTOV, A.İ.NƏCƏFOV, T.B.TAĞİYEV, M.R.QƏZƏNFƏROV**

$\text{TlInSe}_2$  monokristalının volt-ampere xarakteristikasının, fotokeçiriciliyinin və elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, tetraqonal modifikasiyalı  $\text{TlInSe}_2$  monokristalında cərəyanın axma mexanizmi  $E < 10^2 \text{v/sm}$  sahələrində fəza yükləri ilə, sahənin  $E > 10^2 \text{v/sm}$  qiymətlərində isə sahə effekti ilə əlaqədardır. Göstərilmişdir ki,  $\text{TlInSe}_2$  monokristalını ağ işıqla işıqlandırdıqda r- mərkəzlərinin yenidən yüklənməsi hesabına 180 K temperaturda fotocərəyanın sönməsi müşahidə olunur.

**PROPERTIES OF CURRENT FLOW MECHANISM IN MONOCRYSTAL  $\text{TlInSe}_2$**

**R.S.MADATOV, A.I.NAJAFOV, T.B.TAGHIYEV, M.R.GAZANFAROV**

The temperature dependence of  $\text{TlInSe}_2$  monocrystal's volt-ampere characteristics, photoconductivity and electroconductivity has been studied. It has been established that the current flow mechanism in  $\text{TlInS}_2$  monocrystal with a tetragonal modification is connected with the space charges at  $E < 10^2 \text{V/cm}$  fields and the field effects at  $E > 10^2 \text{V/cm}$  values of the field. It has been shown that the photocurrent switches off at 180K temperature at the expense of recharging of r-centers when  $\text{TlInS}_2$  monocrystal is illuminated by white light.

Редактор: Т.Мамедов