

06

## Удельные сопротивления и тензорезистивные характеристики кристаллов твердых растворов системы $\text{TlInSe}_2\text{—CuInSe}_2$

© С.Х. Умаров,<sup>1</sup> И. Нуриддинов,<sup>2</sup> Ж.Ж. Ашууров,<sup>1</sup> Ф.К. Халлоков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Бухарский медицинский институт им. Абу Али ибн Сино, 200118 Бухара, Узбекистан

<sup>2</sup> Институт ядерной физики АН РУз, 100214 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: Salim\_umarov49@mail.ru

(Поступило в Редакцию 17 октября 2017 г.)

На основании исследования концентрационных зависимостей удельных сопротивлений и коэффициентов тензочувствительности сплавов  $\text{Tl}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  в системе  $\text{TlInSe}_2\text{—CuInSe}_2$  в концентрационном интервале  $x = 0\text{—}0.1$  установлено, что в области существования твердых растворов ( $x = 0\text{—}0.025$ ) исследованные характеристики имеют линейные концентрационные зависимости, которые резко изменяются при переходе границы области существования твердых растворов.

DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47073.2514

### Введение

Кристалл  $\text{TlInSe}_2$  является одним из представителей неполновалентных полупроводниковых соединений, имеющим специфическую кристаллическую структуру, состоящую из двух самостоятельных структурных полиэдров — октаэдров с ионами  $\text{Tl}^+$  и тетраэдров с ионами  $\text{In}^{3+}$  [1–3]. Элементарная ячейка этих кристаллов содержит две самостоятельные структурные единицы, обеспечивающие для составляющих разноименных катионов одной и той же группы различную координацию, валентное состояние и характер химических связей. Эти особенности являются причиной резкой анизотропии физических свойств полупроводников данного типа. Цепочечное строение и особенность раскалывания их кристаллов на нитевидные и слоистые пластинки с зеркальными гранями является следствием резкой асимметрии химической связи. Эти характеристики, а также возможность введения разновалентных примесей в кристаллическую решетку  $\text{TlInSe}_2$ , обуславливает повышенный интерес к исследованиям электронной структуры и свойств кристаллов данного класса.

В работах [4–6] обнаружено, что введение в структуру примеси  $\text{Cu}$  приводит к повышению электропроводности, фоточувствительности, увеличению коэффициента тензочувствительности, уменьшению токовых шумов и снижению темнового тока изготовленных на основе кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  фоторезисторов. Целью настоящей работы является изучение влияния изменения концентрации меди на некоторые электрофизические и тензорезистивные характеристики кристаллов системы  $\text{Tl}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  при значениях концентрации  $x = 0\text{—}0.1$ .

### Методика эксперимента

Тройные соединения  $\text{TlInSe}_2$  и сплавы системы  $\text{TlInSe}_2\text{—CuInSe}_2$  были синтезированы усовершенство-

ванным методом Бриджмена–Стокбаргера. Исходными материалами для синтеза являлись элементы особой чистоты: таллий Тl-000, медь ОСЧ 11-4, селен ОСЧ 17-4, индий In-000.

Образцы для измерения электрофизических и фотоэлектрических характеристик кристаллов изготовлялись из свежесколотых плоскопараллельных пластинок с эффективной фоточувствительной площадью  $0.013\text{—}0.054\text{ cm}^2$  и толщиной  $0.02\text{—}0.19\text{ cm}$ . Контакты наносились наплавлением индия. Размеры исследованных образцов составляли  $10 \times 10 \times 0.25\text{ mm}$ . Омические контакты получены точечной сваркой соответствующих проволок конденсаторным разрядом на торцы нагретых в потоке инертного газа образцов на поверхность скола и обеспечивали линейный характер вольт-амперных характеристик (ВАХ) до напряженностей электрического поля  $E = 100\text{ V/cm}$ .

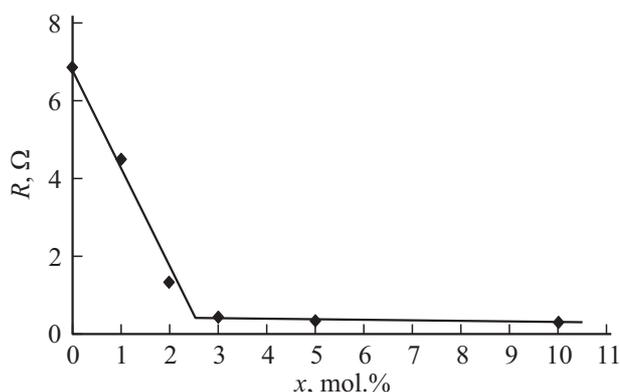
Измерения фототока проводились при немодулированном потоке светового излучения. При изучении стационарной фотопроводимости напряжение в измерительной цепи находилось в пределах линейного участка ВАХ образцов. Тензочувствительность образцов по направлению [001] измерялась в статическом режиме по методике, приведенной в [7] в температурном интервале  $300\text{—}575\text{ K}$ .

### Результаты и их обсуждение

При исследовании электрических свойств монокристаллов системы  $\text{TlInSe}_2\text{—CuInSe}_2$  и производстве этих материалов, структур и приборов возникает необходимость измерения удельного электрического сопротивления или удельной электрической проводимости полупроводниковых материалов  $\text{Tl}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  в виде монокристаллических слитков, образцов различной геометрической формы, пластин, диффузионных, эпитаксиальных и ионно-легированных слоев, составляю-

Таблица 1. Электрофизические и фотоэлектрические параметры кристаллов  $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ 

Составы кристаллов тензодатчиков	Номинальные сопротивления, $\Omega$	Удельные сопротивления $\Omega \cdot cm$	Световые коэффициенты сопротивления $\%/lux$	Световые коэффициенты чувствительности, $\%/lux$	Размеры образцов, $mm^3$
$TlInSe_2$	$6.87 \cdot 10^{10}$	$21.26 \cdot 10^6$	$-1.03 \cdot 10^3$	$1.76 \cdot 10^3$	$0.13 \times 0.25 \times 10.5$
99% $TlInSe_2$ – 1% $CuInSe_2$	$4.49 \cdot 10^{10}$	$13.7 \cdot 10^6$	$-4.01 \cdot 10^3$	$4.36 \cdot 10^3$	$0.13 \times 0.23 \times 9.8$
98% $TlInSe_2$ – 2% $CuInSe_2$	$1.32 \cdot 10^{10}$	$6.4 \cdot 10^6$	$-7.21 \cdot 10^3$	$7.8 \cdot 10^3$	$0.16 \times 0.24 \times 7.9$
97% $TlInSe_2$ – 3% $CuInSe_2$	$4.3 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^6$	$-3.56 \cdot 10^3$	$1.20 \cdot 10^3$	$0.19 \times 0.26 \times 8.5$
95% $TlInSe_2$ – 5% $CuInSe_2$	$2.86 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^6$	$-4.25 \cdot 10^3$	$1.42 \cdot 10^3$	$0.14 \times 0.24 \times 6$
90% $TlInSe_2$ – 10% $CuInSe_2$	$2.64 \cdot 10^9$	$1.31 \cdot 10^6$	–	–	$0.14 \times 0.23 \times 6.5$

Рис. 1. Зависимость номинального сопротивления сплавов  $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$   $R$  от концентрации  $Cu$ .

ших часть полупроводниковых структур. Данные по удельному сопротивлению необходимы для установления важных параметров полупроводникового материала на основе теоретических расчетов или дополнительных экспериментальных данных.

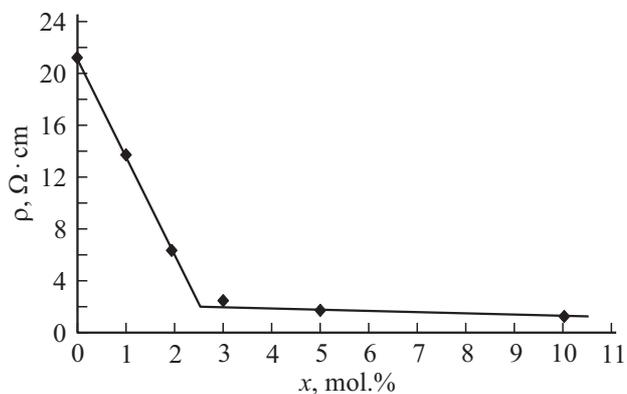
Выбор метода измерения осуществляют с учетом требований к получению информации об особенностях исследуемого материала, возможности изготовления электрических контактов, геометрической формы образца, метрологических характеристик метода измерения. В идеальном случае измерения характеристик монокристаллов твердых растворов  $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$  не должны приводить к разрушению образца и не должны требовать его специальной обработки.

В табл. 1 приведены результаты измерений электрофизических и фотоэлектрических свойств сплавов системы  $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$  в интервале концентрации меди  $x = 0-0.1$ , откуда видно, что номинальное сопротивление

сплавов  $R$  и удельное сопротивление  $\rho$  от концентрации меди  $x$  в интервалах  $x = 0-0.025$  и  $0.025-0.1$  линейно уменьшаются, образуя характерный излом при  $x = 0.025$  (рис. 1 и 2). Именно при концентрации меди  $x = 0.025$  наблюдается скачок коэффициентов светового сопротивления и световой чувствительности легированных образцов (табл. 1, рис. 3 и 4).

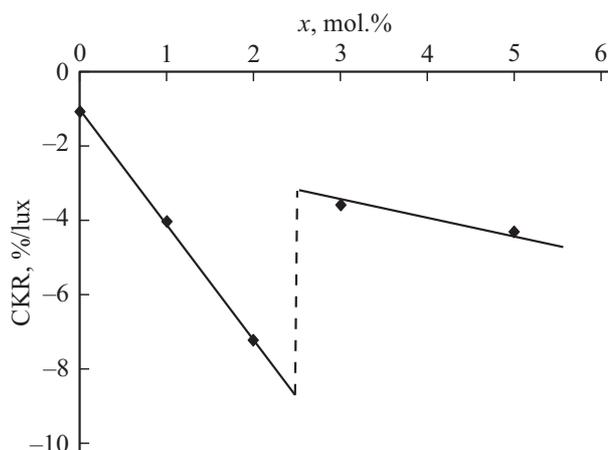
В концентрационных зависимостях среднего значения коэффициента тензочувствительности  $K$  при сжатии и растяжении происходит излом или скачок также при концентрации меди  $x = 0.025$  (рис. 5 и табл. 2).

Авторами [8] на основании дифференциального термического и рентгенофазового анализов, а также измерений удельной электропроводности и плотности сплавов было установлено, что в системе  $TlInSe_2-CuInSe_2$  образуются ограниченные твердые растворы, составляющие при комнатной температуре концентрации до 2.5 mol.% со стороны  $TlInSe_2$  и 1.5 mol.% со стороны  $CuInSe_2$ . На рентгенограммах всех исследованных сплавов проявились только линии  $TlInSe_2$  или  $CuInSe_2$ . В интервале

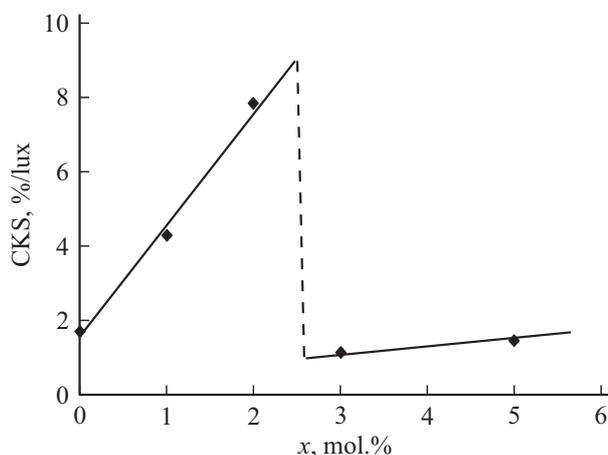
Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления сплавов  $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$  от концентрации  $Cu$ .

**Таблица 2.** Средние значения коэффициента тензочувствительности ( $K_{\text{aver}}$ ) сплавов  $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  вдоль оси [001]

Составы сплавов тензодатчика	$K_{\text{aver}}$ , при сжатии	$K_{\text{aver}}$ , при растяжении
$\text{TlInSe}_2$	464	464
99% $\text{TlInSe}_2$ –1% $\text{CuInSe}_2$	280	862
98% $\text{TlInSe}_2$ –2% $\text{CuInSe}_2$	162	1115
97% $\text{TlInSe}_2$ –3% $\text{CuInSe}_2$	122	341
95% $\text{TlInSe}_2$ –5% $\text{CuInSe}_2$	149	411
90% $\text{TlInSe}_2$ –10% $\text{CuInSe}_2$	300	697

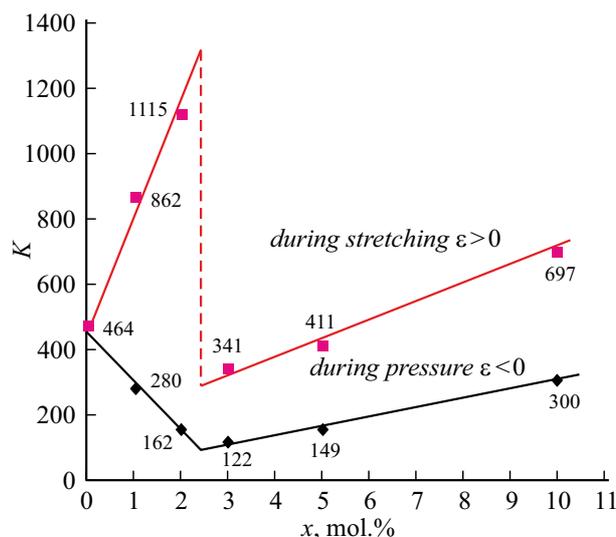


**Рис. 3.** Зависимость светового сопротивления кристаллов  $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  от концентрации Cu.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента световой чувствительности кристаллов  $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  от концентрации Cu.

концентрации меди  $x = 0-0.025$  наблюдаются линии, характерные только для кристаллов  $\text{TlInSe}_2$ , а в интервале концентрации  $0-0.985$  — только для кристаллов  $\text{CuInSe}_2$ . В пределах концентрации меди в интервале  $x = 0.025-0.985$  обнаружены линии, характерные для обоих соединений, т.е. в данном концентрационном интервале сплавы являются двухфазными — они представляют собой смесь кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{CuInSe}_2$  в



**Рис. 5.** Зависимость среднего значения коэффициента тензочувствительности сплава  $\text{Pt}_{1-x}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  вдоль оси [001] от концентрации Cu.

различных соотношениях. Установлено, что в сплавах системы  $\text{Pt}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  в интервале  $x = 0-0.1$  с повышением концентрации меди увеличивается удельная электропроводность сплавов и уменьшаются параметры тетрагональных ячеек, образуя характерный излом при концентрации  $x = 0.025$ , что объясняется фазовым переходом в системе при этой концентрации. Примечательно то, что обнаруженные нами изломы или скачки в концентрационных зависимостях исследованных физических свойств в системе  $\text{Pt}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  происходит именно при значении  $x = 0.025$ . Все это показывает, что в области существования твердых растворов многие свойства системы  $\text{Pt}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$ , в том числе номинальное и удельное сопротивления, коэффициенты светового сопротивления, световой чувствительности и тензочувствительности при фиксированных температурах имеют линейные концентрационные зависимости, которые претерпевают резкое изменение при переходе границы существования твердых растворов.

## Заключение

Исследованы номинальные и удельные сопротивления, а также коэффициенты светового сопротивления, световой чувствительности и тензочувствительности синтезированных сплавов  $\text{Pt}_{(1-x)}\text{Cu}_x\text{InSe}_2$  в системе  $\text{TlInSe}_2$ – $\text{CuInSe}_2$  в концентрационном интервале  $x = 0-0.1$ . В области существования твердых растворов (в пределах  $x = 0-0.025$ ) все исследованные характеристики имеют линейные концентрационные зависимости, которые резко изменяются при переходе границы области существования твердых растворов, что обусловлено концентрационными фазовыми изменениями в системе  $\text{TlInSe}_2$  –  $\text{CuInSe}_2$ .

## Список литературы

- [1] *Guseinov G.D., Ramazanov A.M., Kerimova E.M. et al. // Phys. Stat. Sol.* 1969. Vol. 33. N 1. P. 33.
- [2] *Guseinov G.D., Abdullaev G.B., Bidzinova S.M. et al. // Phys. Lett. A.* 1970. Vol. 33. N 7. P. 412–422.
- [3] *Гусейнов Г.Д.* Поиск и физические исследования новых полупроводниковых аналогов. Автореф. канд. дис. Вильнюс: Вильнюсский гос. ун-т, 1972. 60 с.
- [4] *Нуритдинов И., Умаров С.Х., Рустамов В.Д. // Перспективные материалы.* 2003. № 1. С. 46–48.
- [5] *Ашуров Ж.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х. // Узбекский физич. журнал.* 2008. Т. 10. № 2. С. 132–141.
- [6] *Ашуров Ж.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х. // Перспективные материалы.* 2011. № 1. С. 11–14.
- [7] *Умаров С.Х., Рустамов В.Д., Нуритдинов И. // Перспективные материалы.* 2002. № 6. С. 41–42.
- [8] *Георгобеани А.Н., Матиев А.Х., Хамхоев Б.М., Евловев А.М. // Неорганич. материалы.* 2005. Т. 41. № 5. С. 281–285.