

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

© С.Х. Умаров,¹ И. Нуриддинов,² Ж.Ж. Ашууров,¹ Ф.К. Халлоков¹

¹ Бухарский медицинский институт им. Абу Али ибн Сино, 200118 Бухара, Узбекистан

² 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 TlInSe_2 является одним из представителей неполновалентных полупроводниковых соединений, имеющим специфическую кристаллическую структуру, состоящую из двух самостоятельных структурных полиэдров — октаэдров с ионами Tl^+ и тетраэдров с ионами 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 TlInSe_2 , обуславливает повышенный интерес к исследованиям электронной структуры и свойств кристаллов данного класса.

В работах [4–6] обнаружено, что введение в структуру примеси Cu приводит к повышению электропроводности, фоточувствительности, увеличению коэффициента тензочувствительности, уменьшению токовых шумов и снижению темнового тока изготовленных на основе кристаллов 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 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 изготавливались 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 $E = 100\text{ V/cm}$.

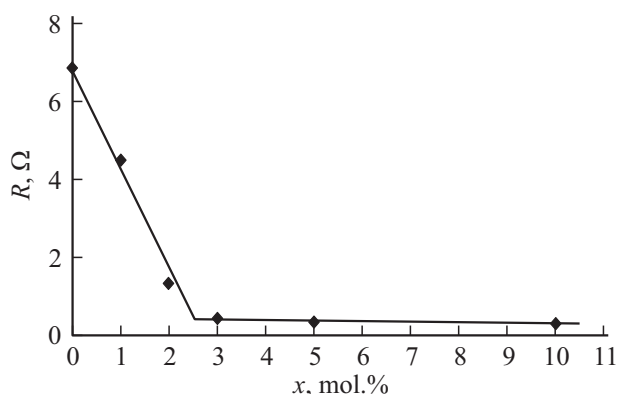
Измерения фототока проводились при немодулированном потоке светового излучения. При изучении стационарной фотопроводимости напряжение в измерительной цепи находилось в пределах линейного участка ВАХ образцов. Тензочувствительность образцов по направлению [001] измерялась в статическом режиме по методике, 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, Ω	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 ρ 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

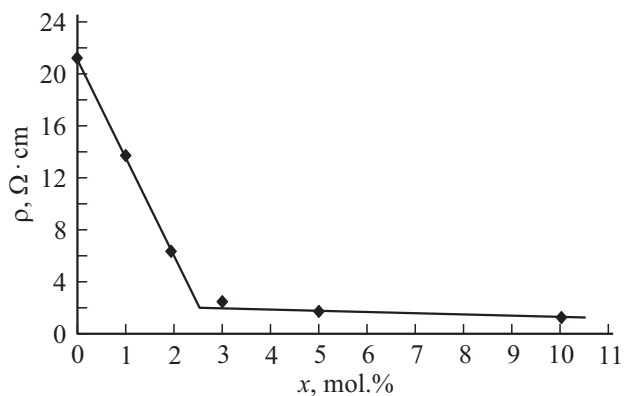
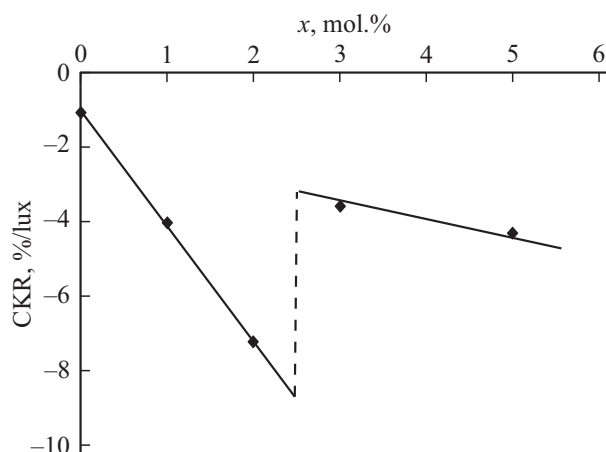
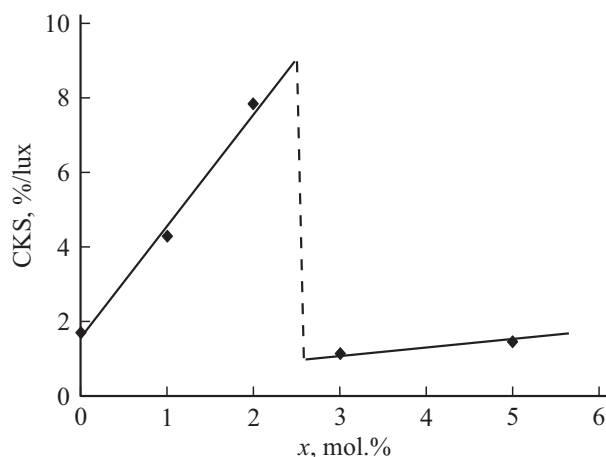
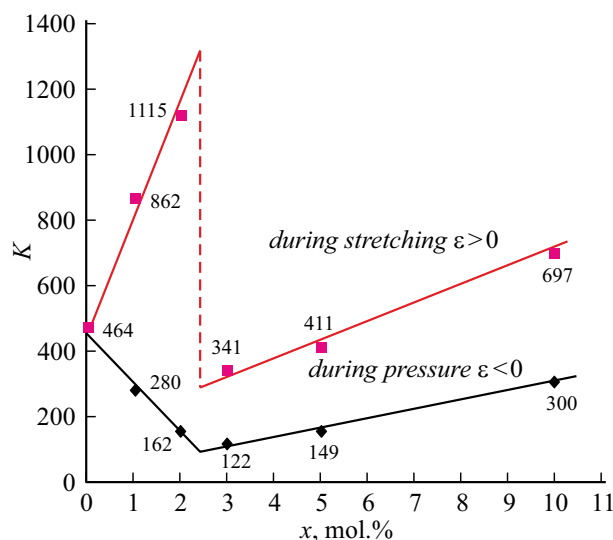
Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления сплавов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu .

Таблица 2. Средние значения коэффициента тензочувствительности (K_{aver}) сплавов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ вдоль оси [001]

Составы сплавов тензодатчика	K_{aver} , при сжатии	K_{aver} , при растяжении
$TlInSe_2$	464	464
99% $TlInSe_2$ –1% $CuInSe_2$	280	862
98% $TlInSe_2$ –2% $CuInSe_2$	162	1115
97% $TlInSe_2$ –3% $CuInSe_2$	122	341
95% $TlInSe_2$ –5% $CuInSe_2$	149	411
90% $TlInSe_2$ –10% $CuInSe_2$	300	697

**Рис. 3.** Зависимость светового сопротивления кристаллов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu .**Рис. 4.** Зависимость коэффициента световой чувствительности кристаллов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu .

концентрации меди $x = 0-0.025$ наблюдаются линии, характерные только для кристаллов $TlInSe_2$, а в интервале концентрации $0-0.985$ — только для кристаллов $CuInSe_2$. 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 $TlInSe_2$ и $CuInSe_2$ в

**Рис. 5.** Зависимость среднего значения коэффициента тензочувствительности сплава $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ вдоль оси [001] от концентрации Cu .

различных соотношениях. Установлено, что в сплавах системы $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$ 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 $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$ происходит именно при значении $x = 0.025$. Все это показывает, что в области существования твердых растворов многие свойства системы $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$, 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 $Tl_{(1-x)}Cu_xInSe_2$ в системе $TlInSe_2-CuInSe_2$ 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 $TlInSe_2 - CuInSe_2$.

Список литературы

- [1] *Guseeinov G.D., Ramazanbaev A.M., Kerimova E.M. et al.* // Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 33. N 1. P. 33.
- [2] *Guseeinov 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., Евлов А.М.* // Неорганич. материалы. 2005. Т. 41. № 5. С. 281–285.