

Влияние температуры и примесей элементов I и IV групп на тензорезистивные свойства монокристаллов TlInSe_2

Ж. Д. Ашуров, И. Нуритдинов, С. Х. Умаров

Исследовано влияние температуры и примесей I и IV групп на тензочувствительность монокристаллов TlInSe_2 . Показано, что увеличение температуры и введение примесей приводит к существенному повышению коэффициента тензочувствительности вдоль кристаллографической оси [001].

Ключевые слова: монокристаллы, тензочувствительность, примеси

In work results of research influence of temperature and impurity I and IV groups on tensorsensitivity monocrystals TlInSe_2 are resulted. It is shown, that influence of temperature and introduction of impurity leads to essential increase of factor tensorsensitivity lengthways crystallographic to an axis [001].

Keywords: monocrystals, tensorsensitivity, impurity

Введение

В настоящее время выявлено много полупроводниковых материалов, в том числе тройных и более сложных соединений. Особую ценность представляют новые полупроводниковые материалы, полученные в виде совершенных крупных монокристаллов.

Среди большого числа новых полупроводниковых материалов особое место занимают полупроводники со слоистой кристаллической структурой. Интерес к подобным полупроводникам как с научной, так и с практической точки зрения с каждым годом возрастает. Поэтому расширение класса именно слоистых полупроводников типа $A^{\text{III}}B^{\text{III}}C_2^{\text{VI}}$, в том числе TlInSe_2 , получение их совершенных монокристаллов и последующее изучение комплекса их физических свойств — актуальные задачи в области современной физики твердого тела.

Среди этого типа кристаллов наиболее подробно изучены фотоэлектрические и электрофизические характеристики кристаллов TlInSe_2 [1], в [2] было показано, влияние примесей I и IV группы на эти свойства. В работах [3, 4] сообщается о перспективности кристаллов TlInSe_2 в качестве тензометрического материала. Однако, данные о влиянии температуры и примесей на тензорезистивные свойства

данного материала практически отсутствуют. В представленной работе было исследовано влияние температуры и примесей I и IV групп на тензорезистивные свойства TlInSe_2 .

Материал и методы исследования

Кристаллы для исследований синтезированы усовершенствованным методом Бриджмена — Стокбергера. В качестве исходных компонентов для синтеза использованы особо чистые элементы: Tl — 000, In — 000, Se — ОСЧ-17-4. Примеси Ag, Cu, Ge, Si и Sn вводили в расплав в расчёте заменить частично индий в соединении: $\text{TlIn}_{1-0,01}A_{0,01}\text{Se}_2$, где A — примеси I или IV групп.

Образцы для измерений были изготовлены в виде прямоугольных параллелепипедов скалыванием монокристаллов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях естественного скола. Омические контакты получали точечной сваркой никелевых проволок конденсаторным разрядом на торцах образцов, нагретых в потоке инертного газа. Тензочувствительность образцов измеряли в статическом режиме по методике, приведенной в [5, 6] в температурном интервале 300–402 К. Размеры и некоторые электрофизические характеристики образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Электрофизические параметры исследованных образцов $\text{TlIn}_{1-x}\text{As}_x\text{Se}_2$ ($x = 0,01$)

Состав кристалла тензодатчика	Размер образцов, мм^3	Номинальное сопротивление, Ом	Удельное сопротивление, Ом·см
$p\text{-TlInSe}_2$	$0,13 \times 0,25 \times 10,5$	$6 \cdot 10^{10}$	$2,13 \cdot 10^7$
$n\text{-TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$	$0,13 \times 0,20 \times 10,5$	$1,2 \cdot 10^9$	$4,8 \cdot 10^5$
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$	$0,12 \times 0,22 \times 10,5$	$1,4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^5$
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$	$0,10 \times 0,18 \times 7$	$2,2 \cdot 10^7$	$0,4 \cdot 10^4$
$p\text{-TlIn}_{1-x}(\text{Ge}, \text{Si}, \text{Sn})_x\text{Se}_2$	$0,12 \times 0,20 \times 10,5$	$4,2 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^5$
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Se}_2$	$0,12 \times 0,18 \times 9$	$5,2 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^5$
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Se}_2$	$0,21 \times 0,31 \times 7,5$	$10,2 \cdot 10^8$	$8,82 \cdot 10^5$

Эксперимент

Малые значения удельного сопротивления тензорезисторов на основе легированных кристаллов, по сравнению с тензорезисторами чистых кристаллов (табл. 1), позволяют достичь высокой чувствительности измерительной схемы при сравнительно малом значении питания ($U_{\text{п}} = 15 - 30 \text{ В}$).

Коэффициент тензочувствительности K определяли как

$$K = \frac{\Delta R_{\varepsilon,0}}{\varepsilon \cdot R_0} \cdot 10^3,$$

где R_0 — удельное электросопротивление образца без деформации ($\varepsilon = 0$), R_{ε} — сопротивление образца при заданной деформации ($\varepsilon \neq 0$).

Температурный коэффициент тензочувствительности G_T определяли по формуле:

$$G_T = \frac{\Delta K / K_0}{\Delta T} \cdot 100\%,$$

где ΔK — приращение коэффициента тензочувствительности при изменении температуры на ΔT , K_0 — начальный коэффициент тензочувствительности при 300 К [5, 6].

Как отмечено в [3, 4], кристаллы TlInSe_2 проявляют сильный пьезорезистивный эффект. Введение примесей I и IV групп в монокристаллы TlInSe_2 приводит к существенному повышению коэффициента их тензочувствительности вдоль кристаллографической оси [001] (табл. 2.).

Температурная зависимость электросопротивления и изменение коэффициента тензочувствительности — важнейшие показатели полупроводниковых тензометрических материалов. При использовании полупроводниковых тензодатчиков в условиях переменной температуры возникает необходимость учета этих показателей. Тензочувствительность многих полупроводниковых соединений значительно понижается с повышением температуры [7]. Отличительной особенностью нелегированных кристаллов

Таблица 2

Среднее значение коэффициента тензочувствительности ($K_{\text{ср}}$) легированных кристаллов $\text{TlIn}_{1-x}\text{As}_x\text{Se}_2$ ($x = 0,01$), по сравнению с чистыми кристаллами TlInSe_2 вдоль оси [001], при относительной деформации $\varepsilon = 0,57 \cdot 10^{-3}$ и 300 К

Состав кристалла тензодатчика	$K_{\text{ср}}$	
	При сжатии	При растяжении
$p\text{-TlInSe}_2$	538	410
$n\text{-TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$	566	537
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}_2$	1308	2829
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$	627	1762
$p\text{-TlIn}_{1-x}(\text{Ge}, \text{Si}, \text{Sn})_x\text{Se}_2$	599	556
$p\text{-TlIn}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Se}_2$	2082	5711

TlInSe_2 является то, что с повышением температуры их чувствительность к деформации в значительной мере увеличивается, и коэффициент тензочувствительности растет линейно (табл. 3).

Таким образом, тензорезисторы на основе нелегированных кристаллов TlInSe_2 позволяют повысить точность регистрации в термостатированных условиях эксплуатации. В условиях с переменной температурой необходимо учитывать соответствующие температурные поправки.

Температурный коэффициент тензочувствительности легированных кристаллов заметно меняется от образца к образцу в зависимости от вида и концентрации примесей и существенно зависит от измеряемого температурного интервала. Для образцов с наибольшей концентрацией примесей характерно наименьшее значение температурных коэффициентов тензочувствительности. Величина этих коэффициентов существенным образом зависит от областей температурного интервала. Так, для легированных кремнием кристаллов TlInSe_2 в области 300 – 402 К коэффициент тензочувствительности, в зависимости от деформации (но независимо от знака деформации), имеет линейный характер (табл. 3). Для монокристаллов, легированных примесями элементов I группы, величина тензочувствительности

Таблица 3

Коэффициент тензочувствительности (К) легированных кристаллов TlInSe_2 , по сравнению с нелегированных кристаллами TlInSe_2 вдоль оси [001], при относительной деформации $\epsilon = 0,57 \cdot 10^{-3}$ и температуры

T, K	Коэффициент тензочувствительности, $K \cdot 10^3$					
	Состав					
	TlInSe_2 <Ge,Si,Sn>	TlInSe_2 <Si _{0,01} >	TlInSe_2 <Ge _{0,01} >	TlInSe_2 <Ag _{0,01} >	n-TlInSe ₂ <Sn>	TlInSe_2
При сжатии						
300	0,599	0,627	1,308	2,082	0,658	0,538
325	0,967	1,148	1,878	3,473	0,802	0,607
350	1,171	1,781	2,642	4,977	1,554	0,766
375	1,360	2,812	4,287	6,431	1,977	0,997
402	1,540	3,855	5,592	7,879	2,570	1,293
При растяжении						
300	0,556	1,762	1,073	2,073	0,537	0,410
325	0,838	2,724	1,729	3,898	0,758	0,512
350	0,946	4,486	2,473	4,726	1,204	0,646
375	1,102	6,548	3,354	5,551	1,505	0,784
402	1,382	9,776	4,483	7,192	1,941	1,045

Таблица 4

Температурный коэффициент тензочувствительности, G_T (%/град.) кристаллов $\text{TlIn}_{1-x}\text{A}_x\text{Se}_2$ ($x = 0,01$) при относительной деформации $\epsilon = 0,57 \cdot 10^{-3}$ и различных температурах

T_{cp} , K	Температурный коэффициент тензочувствительности, G_T					
	Состав					
	TlInSe_2 <Ge,Si,Sn>	TlInSe_2 <Si _{0,01} >	TlInSe_2 <Ge _{0,01} >	TlInSe_2 <Ag _{0,01} >	n-TlInSe ₂ <Sn>	TlInSe_2
При сжатии						
312,5	2,457	3,323	1,743	2,672	0,875	0,513
325,0	2,000	3,681	2,040	2,781	2,732	0,847
337,5	1,694	4,646	3,037	2,785	2,672	1,137
351,0	1,540	5,047	3,211	2,730	2,849	1,376
При растяжении						
312,5	2,029	2,184	2,445	3,521	1,646	0,995
325,0	1,403	3,092	2,610	2,560	2,484	1,151
337,5	1,309	3,621	2,834	2,237	2,403	1,216
351,0	1,456	4,459	3,116	2,421	2,563	1,518

увеличивается, а температурный коэффициент тензочувствительности имеет незначительную величину. Например, при легировании кристаллов TlInSe_2 серебром температурный коэффициент тензочувствительности при различных температурах в интервале 312 – 351 K существенно не изменяется (табл. 4)

Таким образом, введение примесей элементов I и IV группы приводит к существенному увеличению тензочувствительности кристаллов TlInSe_2 . В нелегированных кристаллах, а также легированных примесями кремния, с повышением температуры существенно увеличивается коэффициент тензочувствительности, что позволяет увеличить чувствительность термодатчиков на основе тензорезисторов. В других легированных кристаллах температурный коэффициент тензочувствительности изменяется

незначительно, что важно для стабильной работы тензодатчиков.

Литература

1. Умаров С.Х., Нуритдинов И. Исследование фотоэлектрических свойств твердых растворов $\text{TlInS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$. Перспективные материалы. 2002, № 3, с. 25 – 27.
2. Нуритдинов И., С. Х. Умаров, В. Д. Рустамов Влияние примесей I и IV групп на фотоэлектрические свойства монокристаллов TlInSe_2 . Перспективные материалы, 2003, № 1, с. 46 – 48.
3. Гусейнов Г. Д., Абдуллаев Г. Б. Пьезофоторезистивный эффект на монокристаллах TlInSe_2 . ДАН СССР, 1973, т. 203, № 5, с.1052 – 1054.
4. Умаров С.Х., Рустамов В.Д. Монокристаллы $\text{TlInS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$ – эффективный материал для полупроводниковой тензометрии. Перспективные материалы, 2002, № 6, с. 41 – 42.

5. Умаров С. Х. К методике тензометрических измерений в статическом режиме. Т.: 1992. 9 с. Деп. В Уз НИИНТИ 16.04.1992. № 1209 – Уз 92.
6. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж. Д. Тензорезистивные свойства твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$. Перспективные материалы, 2007, №3, с. 24 – 26.
7. Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука. 1973, 548 с.

Ашуров Жасур Джурсаевич — Бухарский медицинский институт им. Абу Али ибн Сино (Узбекистан), старший преподаватель. Специалист в области биофизики, информатики и информационных технологий. E-mail: djxr@mail.ru.

Нуритдинов Иззатилло — Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией. Специалист в области физики твёрдого тела.

Умаров Салим Халлокович — Бухарский медицинский институт им. Абу Али ибн Сино (Узбекистан), доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой. Специалист в области физики полупроводников и диэлектриков.