МОНОКРИСТАЛЛЫ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0.5$) КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

Ashurov Jasur Djo‘rayevich.
Osiyo xalqaro universiteti “Umumtexnik fanlar” kafedrasi dotsenti,
Tel.: +998907127280,
E-mail: djxp@mail.ru

Аннотация. В работе представлено расширенное исследование тензорезистивных и температурно-зависимых свойств монокристаллов твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0.5$). На основе экспериментальных данных рассмотрены особенности синтеза сплавов, выращивания монокристаллов методом Бриджмена–Стокбаргера, подготовки образцов и проведения статических тензометрических измерений в диапазоне температур 300–410 K. Проведён анализ влияния концентрации кобальта и температуры на коэффициент тензочувствительности. Показано, что увеличение содержания Co и повышение температуры существенно повышают чувствительность кристаллов к механической деформации. Обоснована перспективность использования $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в качестве высокочувствительных материалов для полупроводниковой тензометрии.

Ключевые слова. слоистые полупроводники, монокристаллы, тензочувствительность, тензорезистивный эффект, пьезорезистивность, коэффициент тензочувствительности, полупроводниковая тензометрия, тензодатчики, электрофизические свойства, локальные уровни, *p*-тип проводимости.

Annotatsiya. Ushbu ishda $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0.5$) qattiq eritmalari monokristallarining tenzorezistiv va temperatura bilan bog‘liq xossalari kengaytirilgan holda o‘rganilgan. Eksperimental ma’lumotlar asosida qotishmalarni sintez qilish, Bridjmen–Stokbarger usuli orqali monokristallarni yetishtirish, namunalarni tayyorlash hamda 300–410 K temperaturaviy intervalda statik tenzometrik o‘lchovlarni o‘tkazish xususiyatlari tahlil qilindi. Kobalt konsentratsiyasi va temperatura o‘zgarishining tenzosezgirlik koeffitsiyentiga ta’siri batafsil o‘rganildi. Aniqlanishicha, Co miqdorining ortishi va temperaturaning ko‘tarilishi kristallarning mexanik deformatsiyaga sezgirligini sezilarli darajada oshiradi. $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ qattiq eritmalari yarimo‘tkazgich tenzometriyasi uchun yuqori sezgir materiallar sifatida istiqbolli ekanligi asoslab berilgan.

Kalit so‘zlar. qatlamli yarimo‘tkazgichlar, monokristallar, tenzosezgirlik, tenzorezistiv effekt, pyezorezistivlik, tenzosezgirlik koeffitsiyenti,

ISSN 3030-3907

yarimo‘tkazgich tenzometriyasi, tenzodatchiklar, elektro-fizik xossalar, lokal energetik sathlar, p-tip o‘tkazuvchanlik.

Abstract. This work presents an extended investigation of the strain-resistive and temperature-dependent properties of single crystals of $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0.5$) solid solutions. Based on experimental data, the study examines the specifics of alloy synthesis, single-crystal growth by the Bridgman–Stockbarger method, sample preparation, and the implementation of static strain-gauge measurements within the temperature range of 300–410 K. The influence of cobalt concentration and temperature on the gauge factor has been analyzed in detail. It has been demonstrated that an increase in Co content and temperature significantly enhances the sensitivity of the crystals to mechanical deformation. The results substantiate the potential of $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ as highly sensitive materials for semiconductor strain-gauge applications.

Keywords. layered semiconductors, single crystals, strain sensitivity, strain-resistive effect, piezoresistivity, gauge factor, semiconductor tensometry, strain sensors, electrophysical properties, localized levels, p-type conductivity.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые тензометрические материалы представляют собой одну из важнейших групп функциональных материалов, применяемых для преобразования механических деформаций в электрические сигналы. Такие материалы широко используются в сенсорных системах, в измерительных устройствах, в системах контроля технического состояния конструкций и в различных областях прецизионного приборостроения. В последние десятилетия особое внимание уделяется разработке новых материалов, обладающих высокой тензочувствительностью, термостабильностью и механической прочностью, что обеспечивает высокое качество регистрации даже незначительных деформаций.

Среди многокомпонентных соединений класса $A^{III}–B^{III}–C^{VI}_2$ и твёрдых растворов на их основе выделяются слоистые полупроводники, благодаря их уникальным структурным особенностям, высоким фотоэлектрическим и электрофизическим параметрам. В частности, кристаллы $TlInSe_2$ являются объектом интенсивных исследований, так как они обладают рядом ценных свойств: высокой фотоактивностью, чувствительностью к деформации, стабильностью проводимости и возможностью формирования нитеобразных образцов с гладкими естественными гранями [1].

Однако, несмотря на значительное количество работ, посвящённых $TlInSe_2$, свойства твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ остаются изученными недостаточно. В частности, отсутствуют систематические исследования

ISSN 3030-3907

тензорезистивных характеристик при различных концентрациях Co и при изменении температуры. Между тем, введение взаимозаменяемых атомов Co в кристаллическую решётку $TlInSe_2$ может существенно модифицировать электронные свойства, уровни локализации, подвижность носителей заряда и их концентрацию, что приводит к значительным изменениям коэффициентов тензочувствительности [2].

Таким образом, изучение тензометрических свойств твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ является актуальной научной задачей, имеющей важное значение для развития сенсорных материалов нового поколения.

Целью данной работы является расширенный анализ электрофизических и тензометрических характеристик монокристаллов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$, синтезируемых при различных концентрациях кобальта в интервале $0 \leq x \leq 0.5$, а также исследование влияния температуры на коэффициент тензочувствительности.

2. Методы исследования

2.1. Синтез твёрдых растворов $TlIn_{1-x}CoxSe_2$

Сплавы $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ заданного состава ($0 \leq x \leq 0.5$) получали методом прямого сплавления высокочистых исходных элементов: таллий–000, индий–000, кобальт–000 и селен ОСЧ-17-4. Компоненты помещались в вакуумированные кварцевые ампулы, давление в которых снижалось до $1.2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Ампулы имели толщину стенок, устойчивую к высоким температурам, и внутренний диаметр 12–15 мм. Высота расплава составляла 50–60 мм, что обеспечивало равномерность сплавления [3].

Процесс сплавления проводился в двухзонной установке с автоматическими электронными терморегуляторами, что обеспечивало стабильность теплового режима. Полное гомогенизирующее перемешивание расплава обеспечивало формирование однородного твёрдого раствора.

2.2. Выращивание монокристаллов методом Бриджмена–Стокбаргера

Монокристаллы выращивались усовершенствованным методом Бриджмена–Стокбаргера. Ампула с расплавом перемещалась через температурный градиент со скоростью 0.9 мм/ч, что способствовало формированию крупных однородных монокристаллов. Температура контролировалась двумя независимыми хромель–алюмелевыми термопарами, обеспечивающими точность и стабильность теплового режима.

Кристаллы, полученные данным методом, обладали проводимостью p-типа, что согласуется с известными характеристиками $TlInSe_2$ и его твёрдых растворов.

2.3. Подготовка образцов

ISSN 3030-3907

Слоистая структура $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ обеспечивает естественный раскол кристаллов на нитеобразные элементы с зеркальными поверхностями. Образцы для измерений изготавливались скалыванием монокристаллов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Полученные образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда размером 10×10×0.25 мм.

Омические контакты формировались методом точечной сварки с использованием конденсаторного разряда. При нанесении контактов образцы нагревались в атмосфере инертного газа для предотвращения окисления. [4]

2.4. Методика тензометрических измерений

Тензочувствительность образцов определялась в статическом режиме. Для деформации кристаллов использовалось специальное механическое устройство: образец крепился к стальной пластине толщиной t, которую изгибали за счёт перемещения центральной части на величину Δh относительно опор, расположенных на расстоянии ℓ.

Относительная деформация вычислялась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{4t}{\ell^2}\Delta h$$

Коэффициент тензочувствительности определяли из выражения:

$$K = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R}{\varepsilon},$$

где

R_0 — сопротивление образца при отсутствии деформации,

R_ε — сопротивление при заданной деформации.

Температурные измерения проводились в диапазоне 300–410 K [5].

3. Результаты

3.1. Концентрационные зависимости тензочувствительности

Полученные данные показывают, что коэффициент тензочувствительности K значительно возрастает при увеличении содержания Co в твёрдом растворе. При x = 0.5 величина K превышает соответствующее значение для чистого $TlInSe_2$ более чем в 4–5 раз при температуре 410 K. Это свидетельствует о значительном влиянии замещения индия кобальтом на пьезорезистивные свойства материала.

В частности, при T = 300 K коэффициенты составили:

Таблица 1.

Твердые растворы	T, K
$TlInSe_2$	577
$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	1741
$TlIn_{0,9}Co_{0,1}Se_2$	2839

ISSN 3030-3907

$TlIn_{0,5}Co_{0,5}Se_2$	2951

даже при минимальной деформации $\varepsilon = 0.57 \cdot 10^{-5}$.

3.2. Температурные зависимости тензочувствительности

С ростом температуры наблюдается существенное увеличение коэффициента чувствительности во всех образцах. Так, при 410 K значения коэффициента достигают:

655 (чистый $TlInSe_2$),
4242 (x = 0.01),
6088 (x = 0.1),
7466 (x = 0.5).

Таким образом, повышение температуры усиливает отклик на механическую деформацию, что отличает исследуемые материалы от большинства полупроводниковых тензорезисторов, для которых характерно снижение чувствительности с ростом температуры.

4. Обсуждение

Рост тензочувствительности с увеличением температуры может быть связан с термической активацией носителей заряда и ионизацией локальных уровней, возникающих при введении Co. Дополнительные уровни в запрещённой зоне увеличивают концентрацию носителей, что усиливает изменение сопротивления при деформации.

Слоистая структура $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ позволяет образцам выдерживать значительные изгибные деформации без разрушения. Гибкость, прочность, нитеобразная форма и гладкость граней обеспечивают удобство их применения в качестве тензодатчиков.

Особенно важно, что в отличие от традиционных материалов повышение температуры не ухудшает, а наоборот увеличивает чувствительность датчиков. Это открывает возможности использования $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в условиях переменной температуры и при повышенных требованиях к точности.

Таким образом, результаты демонстрируют высокую перспективность применения материалов данного класса для создания прецизионных тензорезистивных датчиков.

5. Заключение

В работе проведён расширенный анализ свойств монокристаллов твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ при $0 \le x \le 0.5$. Экспериментальные данные показывают:

1. Введение Co существенно повышает коэффициент тензочувствительности.

ISSN 3030-3907

2. Повышение температуры (до 410 K) увеличивает чувствительность во всех составах.

3. Слоистая структура обеспечивает механическую прочность, гибкость и удобство формирования тензочувствительных элементов.

4. Материалы $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ являются перспективными полупроводниковыми тензорезистивными материалами нового поколения.

Таким образом, полученные результаты открывают возможности практического применения этих твёрдых растворов в высокочувствительных тензометрических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Umarov, S. K., Nuritdinov, I., Ashurov, Z. Z., & Khallokov, F. K. (2019). Resistivity and tensoresistive characteristics of TlInSe2–CuInSe2 solid solutions. Technical Physics, 64(2), 183-186.

2. Umarov, S. K., Nuritdinov, I., Ashurov, Z. D., & Khallokov, F. K. (2017). Single crystals of TlIn1–x Co x Se2 (0≤ x≤ 0.5) solid solutions as effective materials for semiconductor tensometry. Technical Physics Letters, 43(8), 730-732.

3. Ашуров, Ж. Д., Нуритдинов, И., & Умаров, С. Х. (2011). Влияние температуры и примесей элементов I и IV групп на тензорезистивные свойства монокристаллов TlInSe2. Перспективные материалы, (1), 11-14.

4. Гусейнов Г.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х., Рустамов В.Д. // Гелиотехника. 2000. № 1. С. 83–88.

5. Умаров, С. Х., Нуритдинов, И., Ашуров, Ж. Ж., & Халлоков, Ф. К. (2019). Удельные сопротивления и тензорезистивные характеристики кристаллов твердых растворов системы TlInSe2–CuInSe2. Журнал технической физики, 89(2), 214-217.

ISSN 3030-3907