



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005"
International Conference "Fizika-2005"
Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
 İyun
 June 2005
 Июнь

səhifə
 page 875-878
 стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $TlInSe_2 (Te_2)$.

ГОДЖАЕВ Э.М.⁽¹⁾, РУСТАМОВ В.Д.⁽²⁾, ДАДАШОВ М.Т.⁽¹⁾

*Азербайджанский технический университет
 прос. Г.Джавида 25, 438-94-37*

Гянджинский государственный университет

В работе излагаются результаты экспериментального исследования тензочувствительности соединений $TlInSe_2$, $TlInTe_2$ в зависимости от механической деформации и оптической потсветки и результаты обсуждения пьезоэлектрических особенностей указанных фаз.

После открытия пьезорезистивного эффекта Смиттом в монокристаллах кремния и германия [1] установилась область широкого технического применения полупроводников – полупроводниковая тензометрия [3-5]. Полупроводниковые тензорезисторы успешно заменяли традиционные металлические проволочные и фольговые тензорезисторы [2-4].

За последние годы XX века заметно возрос интерес применения кристаллов и других полупроводниковых соединений и твердых растворов в тензометрии. Заметный пьезорезистивный эффект обнаружен почти для всех представителей бинарных алмазоподобных полупроводников типа $A^{III} B^V$ [5], а также для – и его аналогов.

Однако, наиболее высокой тензочувствительностью обладает кремний. Тензочувствительность выше перечисленных соединений варьировались в пределах $100 \div 175$. До исследования тройных аналогов $TlSe$, в частности, $TlInSe_2$ наибольшая тензочувствительность обнаружена в $\alpha - SiC$ p -типа проводимости [6].

Однако, исследованиями слоистого монокристалла $p - TlInSe_2$ выявлено, что данная фаза имеет рекордную тензочувствительность, свыше 2000 [7] при деформации 10^{-5} .

Основные общие требования к полупроводниковым тензорезисторам следующие:

- по возможности высокий коэффициент тензочувствительности;
 - линейная зависимость изменения сопротивления с деформацией;
 - отсутствие гистерезиса характеристик;
 - минимальная чувствительность к влиянию побочных внешних физических факторов.
- Полупроводниковые тензорезисторы характеризуются следующими основными параметрами:
- номинальным сопротивлением образца при комнатной температуре;
 - допустимой температурой, выше которой происходят необратимые явления в тензорезисторе;
 - температурным коэффициентом сопротивления
- $$\beta = \frac{\Delta R / R}{T} \cdot 100\%$$
- для различных полупроводников, обычно
- $$\beta = \pm(0,1 \div 0,8)\% / \text{град}$$
- коэффициентом тензочувствительности
- $$K = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon};$$
- температурным коэффициентом тензочувствительности
- $$\gamma = \frac{\Delta K / K}{\Delta T} \cdot 100\%;$$
- допустимой деформацией, при которой тензорезистор выходит из строя;
 - допустимой электрической мощностью.

Эти параметры определяются, в основном, свойствами самого материала, хотя заметное влияние на них может оказывать также и технология изготовления тензорезисторов.

Расширения возможностей применения полупроводниковых тензорезисторов в основном, ведутся в двух направлениях: исследования влияния внешних факторов на пьезорезистивные свойства;

- проведение исследования на новых кристаллах, отличные от известных в полупроводниковой тензометрии материалов, по составу, строению кристаллических решеток и зонной структуры.

Одним из представителей полупроводниковых материалов является тройное соединение $TlInSe_2$. Исследования пьезоэлектрических свойств данной фазы показывают, что $TlInSe_2$ имеет высокую тензочувствительность, большую упругость и прочность на разрыв, обладает способностью легко скалываться на желаемые пластинки с зеркальными гранями в направлении максимального пьезорезистивного эффекта [7,11].

В последующих работах [8] выявлено, что и твердые растворы на основе $TlInSe_2$ являются перспективными материалами в полупроводниковой тензометрии.

Однако, данные по исследованию пьезоэлектрических свойств $TlInTe_2$, являющийся структурным аналогом $TlInSe_2$, кристаллизующихся также в тетрагональной сингонии, имеющих одинаковую пространственную группу I4 (mcm) и зонную структуру [10].

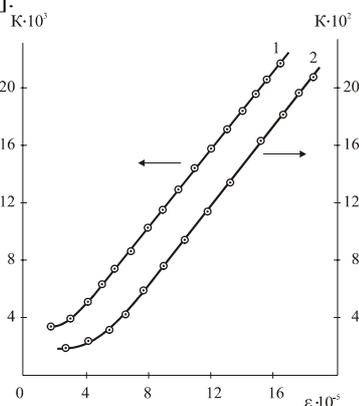


Рис.1. Зависимость коэффициента тензочувствительности от механической деформации: 1- $TlInSe_2$; 2- $TlInTe_2$

Монокристаллы $TlInTe_2$ также имеют значительную гибкость и механическую прочность на разрыв, например, кристаллы $TlInTe_2$ выдерживают деформацию на изгиб радиусом кривизны до 6 мм. Кристалл $TlInTe_2$ также раскалывается на нитевидные образцы с зеркальными гранями.

При исследовании тензочувствительности соединений $TlInSe_2$ (Te_2) при комнатной температуре было установлено, что при малых деформациях до

$\varepsilon = 5 \cdot 10^5$ коэффициент тензочувствительности обеих соединений остается постоянной, а в дальнейшем увеличении линейно увеличивается (рис.1)

При исследовании тензометрических особенностей соединений $TlInSe_2$ и $TlInTe_2$ был обнаружен эффект, заключающийся в изменении тензочувствительности от наличия оптической подсветки. Данный эффект называется пьезорезистивным эффектом. Следует особо отметить, что величина пьезорезистивного эффекта сильно зависит от интенсивности и спектрального состава оптической подсветки. Относительное изменение сопротивления $TlInSe_2$ и $TlInTe_2$ на единицу деформации при различных значениях интенсивности оптической подсветкой приводятся на рис. 2.

Причиной выявленного эффекта при оптической подсветке кристаллов, по видимому связанных с тем, что оптическая подсветка заполняет межзонные локальные уровни а последние вносят свой вклад в перераспределение носителей между соответствующими долинами.

Следует особо подчеркнуть, что наблюдаемый пьезорезистивный эффект в сущности не имеет ничего общего с близкими по названию известными эффектами: пьезооптическим изменением показателя преломления механическими напряжениями, фото-механическим уменьшением твердости при воздействии света и т.д.

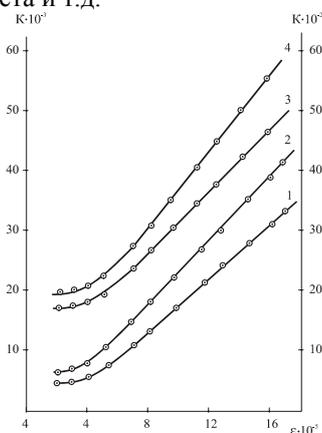


Рис.2. Зависимость коэффициента тензочувствительности от механической деформации соединений $TlInSe_2$ (1,2) и $TlInTe_2$ (3,4) 1 и 3 без освещенности 2 и 4 при освещенности 1000 люкс.

По нашему мнению причиной выявленного сильного пьезорезистивного эффекта в монокристаллах типа TlSe, в частности, $TlInSe_2$ и $TlInTe_2$ является сложная их энергетическая структура, многодолинность, резкая анизотропия эффективных масс, подвижности носителей заряда и т.д

Действительно, недавно [12, 13] методами псевдопотенциала расшифрована зонная структура вышеуказанных соединений. Показано, что самая нижняя, состоящая из четырех зон группа своим происхождением обязано 4s состояниям селена и 5s

состояниям теллура. Другая группа из четырех зон в основном обусловлена 6s состояниями атомов таллия и 5s состояниями атомов индия. Верхняя группа из десяти зон в области 0-4эВ в основном образовано из р состояний атомов селена, теллура, индия и таллия. В этих кристаллах максимальный тензорезистивный эффект выявлено экспериментально. Кристаллы TlInSe₂ (Te₂) подверглись направленному изгибу, кручению и растяжке вдоль тетрагональной оси.

С целью проверки зависимости пьезорезистивного эффекта от угла вращения плоскости изгиба, кристаллы с выводами были вертикально посажены на ось индикатора.

К верхнему торцу кристалла приклеен магнитный кончик, а изгиб кристалла осуществлялся воздействием электромагнита (РП-7), установленного в поперечном направлении. Величина отклонения свободного конца во всех направлениях выдерживалась постоянной и контролировалась по визирным линиям микроскопа МБС-1. Угол вращения плоскости отчитывался по стрелке индикатора. Однако, ни в одном из направлений свободного изгиба при этом не был обнаружен заметный пьезорезистивный эффект в кристаллах TlInSe₂ и TlInTe₂. Последний оказался заметным при испытании на кручении. Испытываемые кристаллы с выводами были установлены на оси индикатора, верхний конец его закреплен жестко. Заметное изменение сопротивления TlInSe₂ с углом кручения было обнаружено от 60 до 90°, а для TlInTe₂ от 50 до 80°, пределом кручения оказался 102° для TlInSe₂, 96° для TlInTe₂.

Следует отметить, что максимальный пьезорезистивный эффект при этом имел место при растяжке кристаллов вдоль кристаллографической оси $|001|$.

Величина эффекта зависит от степени деформации, температуры и оптической подсветки.

Известно [8], что коэффициент тензочувствительности определяется формулой:

$$R = \frac{(\Delta h)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}{2 \cdot \Delta h}$$

где l - длина участка балки, испытывающей деформацию чистого прогиба; Δh – максимальный прогиб балки, определенной по индикатору. Нами полученные результаты показали, что коэффициент тензочувствительности в зависимости от степени деформации от 10^{-5} до $15 \cdot 10^{-5}$ характеризуется двумя областями.

В области малых деформаций до $4 \cdot 10^{-5}$ коэффициент тензочувствительности от деформации не зависит, в то время как в области от $4 \cdot 10^{-5}$ до $15 \cdot 10^{-5}$ зависимость коэффициента тензочувствительности от деформации носит линейный характер (рис 1), аналогично имеющейся для других полупроводников.

Описанные выше данные в первом приближении позволяют получить определенную информацию о строении заданных кристаллов. Из результатов исследования зонной структуры известно, что в тройных кристаллах типа TlSe поверхности постоянной энергии представляют собой трехосные эллипсоиды общего вида.

Выявленный пьезорезистивный эффект в кристаллах вышеуказанного типа находят качественное объяснение на основе четырехэллипсоидной модели при расположении экстремумов в точках Γ ($N_{\Gamma} = 1$ эллипсоид), T ($N_T = 4 \cdot 1 / 4 = 1$ эллипсоид) и N ($N_N = 4 \cdot 1/2 = 2$ эллипсоида) с вытянутыми осями эллипсоидов вдоль соответствующей осей симметрии (рис. 3).

Закон дисперсии на плоскостях для носителей в долинах:

$$N - \varepsilon = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{K_x^2}{m_{11}} + \frac{K_x^2}{m_{\perp}} \right),$$

$$T - \varepsilon = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{K_x^2}{m_{11}} + \frac{K_y^2}{m_{\perp}} \right)$$

$$\text{и } \Gamma - \varepsilon = \frac{\hbar^2}{2} \left(\frac{K_x^2}{m_{\perp}} + \frac{K_z^2}{m_{11}} \right)$$

где m_{11} и m_{\perp} соответственно осям эллипсоида назовем продольной и поперечной эффективной массой носителей.

Соответствующий подвижности носителей тока

$$\text{при этом: } \mu_{\parallel} = \frac{q\tau}{m_{11}} \text{ и } \mu_{\perp} = \frac{q\tau}{m_{\perp}}$$

Если общее число носителей в долинах Γ , T и N окажется $n_0 / 4$, $n_0 / 4$, и $2 \cdot n_0 / 4$, соответственно. Вклад в проводимость от соответствующих долин в направлении параллельном тетрагональной оси

$$\text{окажется: } \sigma_{\Gamma}^{\parallel} = e \cdot \frac{n_0}{4} \mu_{\parallel}, \quad \sigma_T^{\parallel} = e \cdot \frac{n_0}{4} \mu_{\perp} \quad \text{и}$$

$$\sigma_N^{\parallel} = e \cdot 2 \cdot \frac{n_0}{4} \mu_{\perp}.$$

Следовательно, общая электропроводность вдоль

$$\text{оси } |001|: \sigma_0^{\parallel} = \sigma_z = en_0 \frac{3\mu_{\perp} + \mu_{\parallel}}{4}$$

Однако, при односторонней деформации кристаллов вдоль оси $|001|$ изменится соотношение числа тяжелых, с подвижностью μ_{\parallel} и легких, с подвижностью μ_{\perp} дырок, принимающих участие в электропроводности в данном направлении. Указанное изменение, вызванное перетеканием носителей из долины в долину, видимо и обуславливает гетерорезистивный эффект. При растяжении кристаллов по оси $|001|$ относительное число тяжелых дырок, движущихся в данном направлении, увеличивается, следовательно уменьшится проводимость, а при сжатии наоборот. Причиной перераспределения носителей по долинам является то обстоятельство, что экстремумом по отношению к односторонней деформации находятся в разных условиях: при растяжении кристаллов вдоль оси $|001|$ неизбежно произойдет сжатие их в направлениях $|100|$ и $|110|$, в результате, экстремум Γ на оси $|001|$ при этом поднимается, а соответствующие экстремумы T и N на осях $|100|$

и $|110\rangle$ опустятся (рис. 3 пунктирные линии). Изменится и вклад соответствующих долин в общую электропроводность в направлении $|001\rangle$, вследствие протекания носителей из Т и N долин в долине Г.

Таким образом, проводимость кристаллов типа TlSe вдоль оси $|001\rangle$ при растяжении их в том же направлении:

$$\sigma_N^{||} = \frac{en_0}{4} \cdot (3\mu_{\perp} + \mu_{||}) + \frac{e\Delta n}{4} (\mu_{||} - \mu_{\perp})$$

Следовательно, изменение электропроводности за счет растяжения при этом окажется отрицательным, т.е.:

$$\Delta\sigma_p^{||} = \frac{e\Delta n}{4} (\mu_{||} - \mu_{\perp}) < 0$$

так как $\mu_{\perp} > \mu_{||}$

А в случае сжатия: $\Delta\sigma_p^{||} = \frac{e\Delta n}{4} (\mu_{\perp} - \mu_{||}) > 0$ т.е.

проводимость вдоль $|001\rangle$ при растяжении уменьшается, а при сжатии – увеличивается, что качественно согласуется с экспериментом.

Отметим, что наличие сильного пьезорезистивного эффекта в кристаллах TlInSe₂ и TlInTe₂ позволит создать на их основе высокочувствительные датчики перемещения, усилия и давления. Чувствительность датчиков из соединений TlInSe₂ и TlInTe₂ к

измеряемым величинам можно повысить и управлять с температурой и оптической подсветкой.

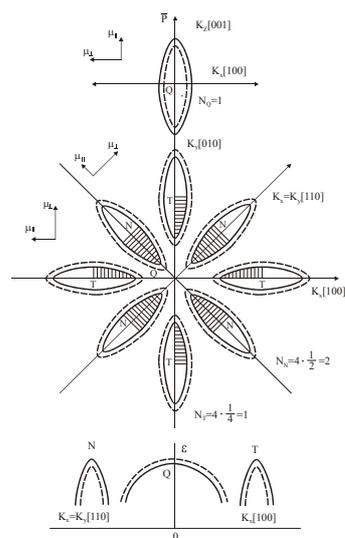


Рис.3 Четырех эллипсоидальная модель

- [1]. Smith C.S. Piezoresistance effect in Germanium and Silicon. Phys. Rev. V. 94, № 1- 3, 42 – 44, 1954.
- [2]. Немец И. Практическое применение тензодатчиков. М.: Энергия, 1970, - 278 с.
- [3]. Дина М. Полупроводниковые тензодатчики. М.: Энергия, 1968, - 215 с.
- [4]. Ильинская Л.С., Подмарков А.Н. Полупроводниковые тензодатчики. М. Энергия, 1966, - 118 с.
- [5]. Полупроводниковая тензометрия (Труды III Совещания, 27 июня – 3 июля), ч I МВССО РСФСР, НЭТИ, Новосибирск, 1969.
- [6]. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1960, - 395 с.
- [7]. А.С. 401 208 (СССР) Полупроводниковый тензодатчик (Г.Д. Гусейнов, Г.Б. Абдуллаев). 1973.
- [8]. Годжаев Э.М., Халилов С.Х., Халилова Х.С., Гусейнов М.С., Сулейманова А.М. Пьезоэлектрические свойства кристаллов $TlIn_{1-x}Nd_xSe_2$. Инженерно – физический журнал 2003, том 76, № 2, с. 170 – 172.
- [9]. Холл Р.Н. Труды IX Международной конференции по физике полупроводников, т. I, с. 510, Ленинград, 1969.
- [10]. Т.Д. Гусейнов. Некоторые итоги и перспективы поиска сложных полупроводников. Успехи физических наук, 1969, т. 99, в. 3, с.508.
- [11]. Т.Д.Гусейнов, Г.Б.Абдуллаев. Пьезорезистивный эффект на монокристаллах $TlInSe_2$, ДАН СССР, 1973, т.208, № 5, с. 1052 – 1054.
- [12]. Guseyn Orudzev, Nazim Mamedov, Hisao Uchiki, Nobuyuki Yamamoto, Seishi Jida, Hideyu ki, Toyota, Eldar Gojaev, Firudin Heshimzade Band structure and optical functions of ternary chain $TlInSe_2$. Journal of physics and Chemistry of Solids 64 (2003) 1703 – 1706.
- [13]. Годжаев Э.М., Оруджев Г.С., Кафарова, Д.М. Зонная структура и диэлектрическая проницаемость соединения $TlGaTe_2$, ФТТ, 2004, т.46, в. 5, с. 811 - 813