

Неоднородность электрических свойств монокристаллов PbTe в направлении роста

© Н.Б. Мустафаев, Г.З. Багиева, Г.А. Ахмедова, З.Ф. Агаев[†], Д.Ш. Абдинов

Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,
AZ 1143 Баку, Азербайджан

(Получена 18 июня 2007 г. Принята к печати 11 марта 2008 г.)

Установлено, что вдоль монокристаллического слитка PbTe, выращенного методом Бриджмена, существует неоднородность электрических параметров, обусловленная неравномерным распределением „избыточного“ теллура. В запрещенной зоне монокристаллов PbTe, кроме мелких акцепторных и донорных уровней, имеются глубокие акцепторные уровни с энергией активации ~ 0.1 эВ, не связанные с избыточным теллуrom и проявляющиеся в образцах с малой концентрацией мелких уровней при относительно высоких температурах.

PACS: 72.20.Mu, 72.20.Pa, 72.80.Ey

1. Введение

Электрофизические свойства теллурида свинца были исследованы многократно [1–3]. Однако трудность выращивания монокристаллического PbTe стехиометрического состава затрудняет получение однозначных данных по его электрическим свойствам. Теллурид свинца получается со значительным отклонением от стехиометрии. При этом вакансии в подрешетке свинца являются акцепторами, а в подрешетке теллура — донорами [2–4]. Концентрация носителей тока, возникающая благодаря отклонению от стехиометрии, достигает $10^{18} - 10^{19}$ см⁻³. В специально не легированных образцах PbTe электрические свойства в первую очередь определяются концентрацией избыточных атомов Te и Pb. Исследование области устойчивости PbTe показывает, что относительно стехиометрического состава она сдвинута в сторону теллура и при затвердевании из стехиометрического расплава в первую очередь выпадает твердая фаза с избытком теллура [1,2]. Это должно привести к изменению электрических параметров данного материала вдоль монокристаллических слитков.

В настоящей работе выращены монокристаллы PbTe и исследованы изменения электрических свойств вдоль слитков.

2. Методика эксперимента

Монокристаллы PbTe были выращены методом Бриджмена из стехиометрического состава. Технологические параметры синтеза и выращивания монокристаллов PbTe приведены в [5]. Диаметр и длина выращенных слитков составляли ~ 14 и ~ 30 мм соответственно. Монокристалличность слитков подтверждена рентгеновским методом. Монокристаллические слитки были разрезаны на 6 шайб толщиной 3 мм на электроискровой установке. Шайбы были пронумерованы от

начала монокристаллического слитка, где начинается первичная кристаллизация, к концу слитка. Из этих шайб вырезались образцы для исследования в виде прямоугольных параллелепипедов с геометрическими размерами $3 \times 5 \times 12$ мм (образцы 1–6). Для удаления нарушенного слоя, образующегося на поверхности при резке, поверхность образцов после резки обрабатывали электрохимическим травлением в растворе $\text{KOH} + \text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}$. Электрические параметры измеряли на постоянном токе зондовым методом вдоль большой грани (длины) образца.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты измерений представлены на рис. 1–3. Видно, что до 150–225 К электропроводность (σ) образцов с ростом температуры (T) падает по закону $\sigma \propto T^{-n}$

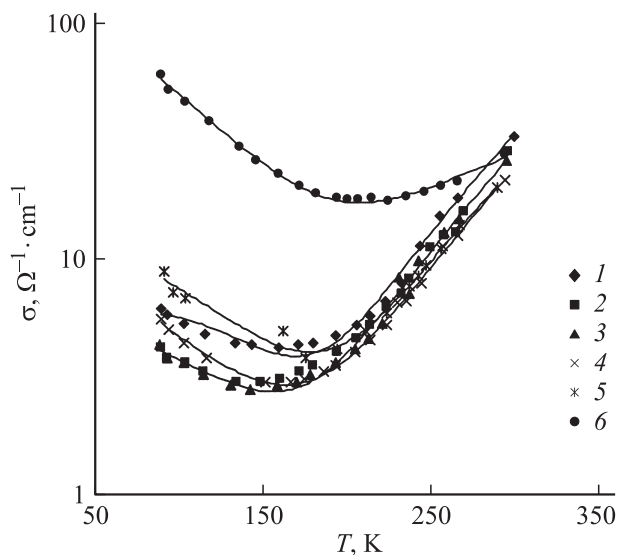


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности монокристаллов PbTe. Нумерация данных соответствует нумерации образцов.

[†] E-mail: agayevz@rambler.ru

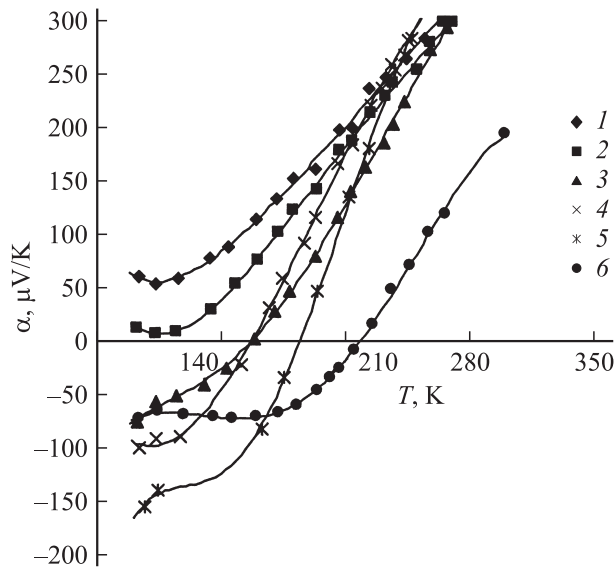


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента термоэдс монокристаллов PbTe. Нумерация данных соответствует нумерации образцов.

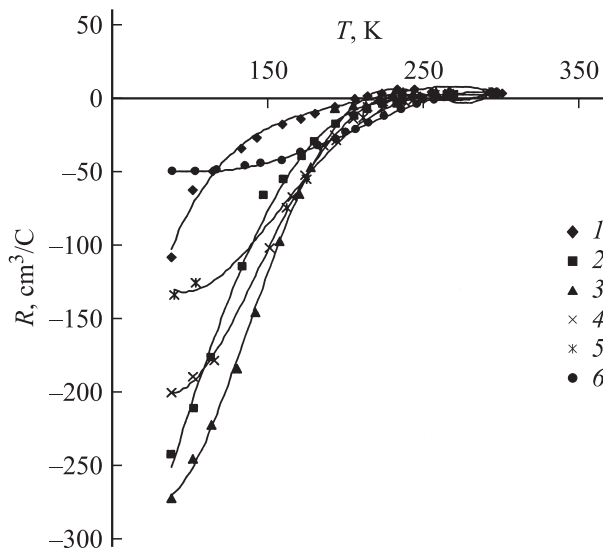


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристаллов PbTe. Нумерация данных соответствует нумерации образцов.

($n \approx 1.5$), а выше этих температур имеет полупроводниковый характер. Энергия активации электропроводности, вычисленная из высокотемпературной части $\sigma(T)$, для образцов 1–5 составляет ~ 0.1 эВ.

Знак коэффициента термоэдс (α) для образцов 1 и 2 во всем интервале температур положителен. При 77 К с ростом номера образца (т.е. с удалением от начала первичной кристаллизации) значение α уменьшается и начиная с образца 3 приобретает отрицательный знак. С ростом температуры абсолютное значение α образцов 3–6 уменьшается; при некоторой температуре α меняет свой знак от отрицательного к положительному,

а затем растет с температурой как и в образцах 1, 2. При этом с ростом номера образца температура, при которой происходит смена знака α , смещается в сторону высоких значений (от ~ 140 К для образца 3 до 220 К для образца 6). При 77 К коэффициент Холла (R) для всех образцов имеет отрицательный знак, а с ростом температуры переходит в область положительных значений. С ростом номера образца точка инверсии знака R , как и для α , смещается в сторону высоких температур (от ~ 205 К для образца 1 до 260 К для образца 6).

Рост σ образцов при температурах выше $\sim (150–225)$ К можно было бы объяснить наступлением собственной проводимости или прыжковой проводимостью, что наблюдается в образцах PbTe с высоким содержанием индия [4,6]. Однако наблюдаемое значение энергии активации, инверсия знака α и R с отрицательного на положительный, а также рост α с температурой после инверсии противоречат такому объяснению.

Вследствие этого для объяснения температурных зависимостей σ, α, R в области от 77 до 300 К следует принять, что в запрещенной зоне исследованных образцов существуют глубокие примесные (акцепторные) уровни с энергией ионизации ~ 0.1 эВ. Так как энергия ионизации этих уровней для образцов 1–5 почти одинаковая, можно считать, что они не связаны с атомами избыточного теллура. По-видимому, избыточные атомы теллура создают либо очень мелкие уровни, либо уровни, сливающиеся с зоной. Электрические свойства образцов кристаллов PbTe до температур $\sim (150–225)$ К определяются этими мелкими уровнями.

Концентрация и энергия активации глубоких уровней таковы, что они обнаруживаются только в образцах с малой электропроводностью (меньше $\sim 5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при ~ 150 К), т.е. в образцах с малой концентрацией мелких уровней. Подобные выводы сделаны и авторами работы [7].

Отрицательный знак α и R при низких температурах свидетельствует о том, что в образцах существуют и мелкие донорные уровни с концентрацией, близкой к концентрации мелких акцепторов. Подвижность электронов в PbTe в ~ 2 раза превышает подвижность дырок. В общем случае знак R определяется знаком величины $\{1 - (n/p)(\mu_n^2/\mu_p^2)\}$, где n, p — концентрации, μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок соответственно [8]. Это обуславливает отрицательный знак коэффициента Холла при дырочной проводимости (образцы 1 и 2), а также более высокую температуру инверсии знака R по сравнению с коэффициентом α .

4. Заключение

Таким образом, выяснено, что вдоль монокристаллического слитка PbTe, выращенного методом Бриджмена, существует неоднородность электрических параметров, обусловленная неравномерным распределением „избыточного“ теллура. В запрещенной зоне монокристаллов PbTe, кроме мелких акцепторных и донорных

уровней, существуют глубокие акцепторные уровни с энергией активации ~ 0.1 эВ, не связанные с избыточным теллуром. Эти уровни проявляются в образцах с малой концентрацией мелких уровней при относительно высоких температурах, именно при температурах выше $\sim (150-225)$ К, в образцах с удельной электропроводностью $\sim (5-6) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при 150 К.

Список литературы

- [1] Е. Патли. В кн.: *Материалы, используемые в полупроводниковых приборах* (М., Мир, 1968) с. 97.
- [2] Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS* (М., Наука, 1968).
- [3] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145** (1), 51 (1985).
- [4] Ю.И. Равич, С.А. Немов. ФТП, **36** (1), 3 (2002).
- [5] З.Ф. Агаев, Э.М. Аллахвердиев, Г.М. Муртузов, Д.Ш. Абдинов. Неорг. матер., **39** (5), 543 (2003).
- [6] С.Н. Лыков, Ю.И. Равич, И.А. Черник. ФТП, **11** (9), 1731 (1977).
- [7] П.М. Старик, П.И. Воронок. Изв. АН СССР. Сер. физ., **28** (8), 321 (1964).
- [8] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1975).

Редактор Л.В. Шаронова

Heterogeneity of electrical properties of PbTe single crystals in the growth direction

N.B. Mustafayev, G.Z. Bagiyeva, G.A. Ahmedova, Z.F. Agayev, J.Sh. Abdinov

Abstract It is established, that along PbTe single crystals grown by the Bridgeman method there is a heterogeneity of electrical parameters, caused by nonuniform distribution of „excess“ tellurium. In the band gap of PbTe single crystals, in addition to shallow acceptor and donor levels, deep acceptor levels exist with activation energy ~ 0.1 eV, not connected with excess tellurium and appearing in samples with small concentration of shallow levels at rather high temperatures.