

Влияние отжига на электрические свойства монокристаллов PbTe, легированных таллием

© Г.А. Ахмедова[¶], Г.Дж. Абдинова, Д.Ш. Абдинов

Институт физики им. Г.М. Абдуллаева Национальной академии наук Азербайджана, AZ-1143 Баку, Азербайджан

(Получена 30 сентября 2009 г. Принята к печати 23 июня 2010 г.)

Выяснено, что значения электрических параметров образцов монокристаллов PbTe и характер зависимости этих параметров от температуры и концентрации примеси Tl, а также тип проводимости кристаллов (знаки α и R) существенно определяются температурой предварительного их отжига. Это объясняется тем, что с ростом температуры отжига растет концентрация двукратно заряженных вакансий в подрешетке теллура, приводящей к увеличению вероятности образования электронейтральных или однократно заряженных комплексов типа примесный атом–вакансия.

1. Введение

Примеси таллия в халькогенидах свинца, в том числе в PbTe, являются глубокими акцепторами [1–5]. При этом выяснено, что до определенной концентрации таллия (для PbTe до $9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) [2,5] холловская концентрация дырок (p) при 77 К растет пропорционально N_{Tl} , причем каждый атом Tl создает дырку в валентной зоне. В области больших концентраций таллия функция $p(N_{\text{Tl}})$ при $T = 77 \text{ К}$ демонстрирует тенденцию к насыщению, причем предельная концентрация дырок ($\sim 1.2 \cdot 10^{20} - 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) в несколько раз ниже растворимости Tl в халькогенидах свинца. Такая зависимость p от N_{Tl} объясняется самокомпенсацией акцепторного действия таллия собственными дефектами в этих соединениях [5–7]. Халькогениды свинца кристаллизуются со значительными отклонениями от стехиометрии, что обуславливает наличие электрически активных собственных дефектов (в основном вакансии в подрешетке металла или халькогена) с концентрацией, достигающей $\sim 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [8].

Концентрация структурных дефектов зависит от реальной структуры (поли- или монокристалличности) образца, а также режима их термической обработки [9,10].

Поэтому для получения дополнительной информации о механизме компенсации акцепторного действия Tl структурными дефектами в данной работе исследованы электрические свойства образцов монокристаллов PbTe в примесь Tl, прошедших предварительно термические обработки при температурах 473, 573, 673, 873 К.

2. Методика эксперимента

Монокристаллы PbTe с различными концентрациями Tl были выращены методом Бриджмена из стехиометрического состава. Технологические параметры синтеза и выращивания монокристаллов PbTe приведены в работе [11], монокристалличность слитков подтверждена рентгеновским методом. Из монокристаллических

слитков на электроэрозионной установке вырезались образцы для исследования в виде прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами $3 \times 3 \times 12 \text{ мм}$. Электрические параметры измеряли на постоянном токе зондовым методом вдоль слитка. Термообработка образцов проводилась в атмосфере спектрально-чистого аргона в течение 120 ч.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты измерений по влиянию термической обработки на электропроводность (σ), коэффициенты термоэдс (α) и Холла (R) нелегированных образцов монокристаллов PbTe представлены на рис. 1. Видно, что зависимость σ от температуры для образца, не прошедшего термообработку, и образцов, прошедших термообработку при 473, 573 К, при низких температурах обладают полупроводниковым характером. При этом с ростом температуры отжига температурный интервал, в котором наблюдается полупроводниковый характер $\sigma(T)$, сужается. Образцы, прошедшие отжиг при 673 и 873 К, обладают металлическим характером $\sigma(T)$. Знак α образцов, обладающих при низких температурах полупроводниковым характером $\sigma(T)$, положительный, и с ростом температуры значение α растет. Знак коэффициента термоэдс образцов, прошедших термообработку при 673 К, до $\sim 230 \text{ К}$ отрицательный, а выше этой температуры положительный. Образцы, прошедшие термообработку при 873 К, обладают n -типом проводимости во всем интервале температур, и абсолютное значение α в этом случае в ростом температуры растет. Примерно аналогичные (как в случае α) результаты наблюдаются и для коэффициента Холла. Эти результаты свидетельствуют о том, что значения и характер температурных зависимостей электрических параметров, а также тип проводимости образцов монокристаллов PbTe существенно определяются температурами термообработки, которые они проходили. Интересные результаты получены и по влиянию таллия на электрические свойства монокристаллов PbTe, прошедших термообработку при различных температурах.

[¶] E-mail: gulgun_ahmed@yahoo.com

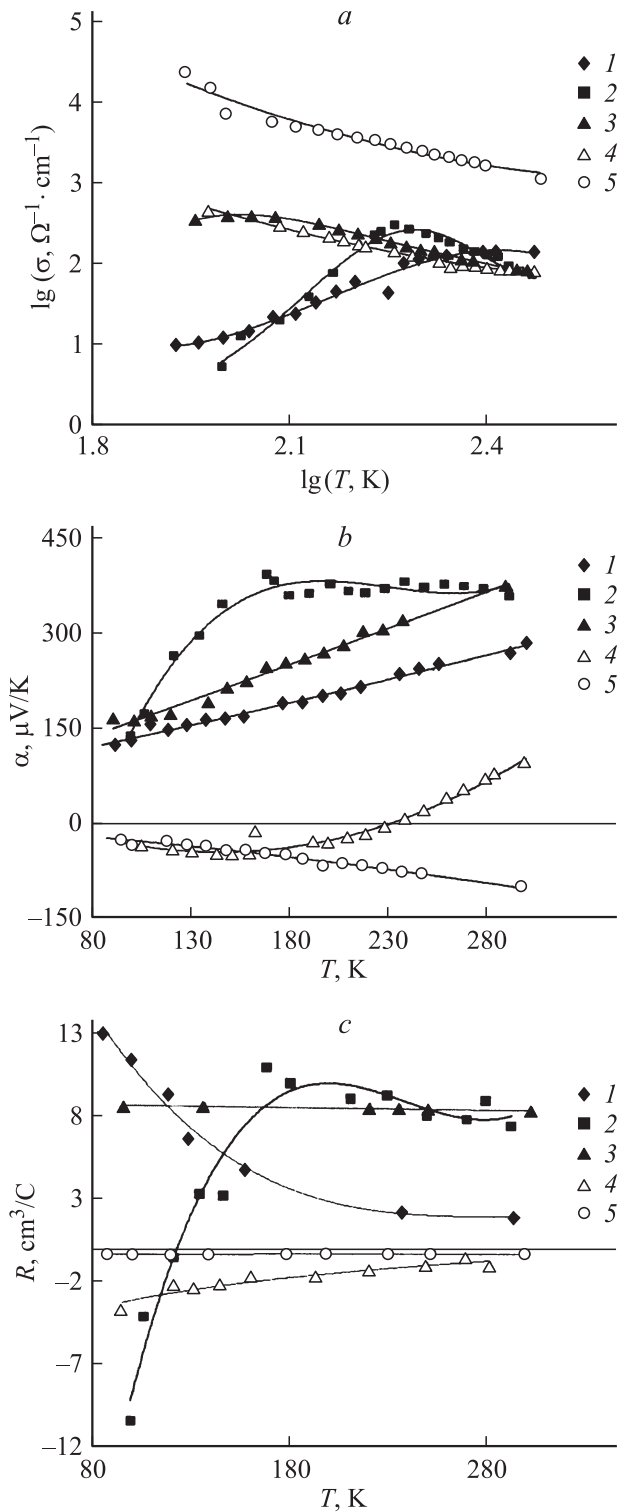


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности (а), коэффициентов термоэдс (б) и Холла (с). Кривые 1–5 относятся соответственно к образцу неотожженному (1) и образцам, отожженным (2–5) при 473, 573, 673, 873 К.

На рис. 2 представлены зависимости концентрации носителей тока (а) и электропроводности (б) от концентрации таллия для образцов, прошедших термообработку

при различных температурах. Видно, что в этих случаях характер зависимостей $n(N_{\text{Tl}})$ и $\sigma(N_{\text{Tl}})$ различен для образцов, прошедших термообработку при различных температурах. В образцах, не прошедших термообработку до концентрации $N_{\text{Tl}} = 0.01$ ат%, холловская концентрация и электропроводность при 77 К растут пропорционально N_{Tl} . В области больших концентраций таллия функции $n(N_{\text{Tl}})$ и $\sigma(N_{\text{Tl}})$ при 77 К демонстрируют тенденцию к насыщению. Такие зависимости полностью согласуются с результатами работ [5–7,12–14] и могут быть объяснены явлением самокомпенсации акцепторного действия таллия собственными дефектами в РbТе, предложенными в этих работах.

С ростом температуры отжига рост σ и n при малых концентрациях Тl (до ~ 0.01 ат%) ослабляется, а после

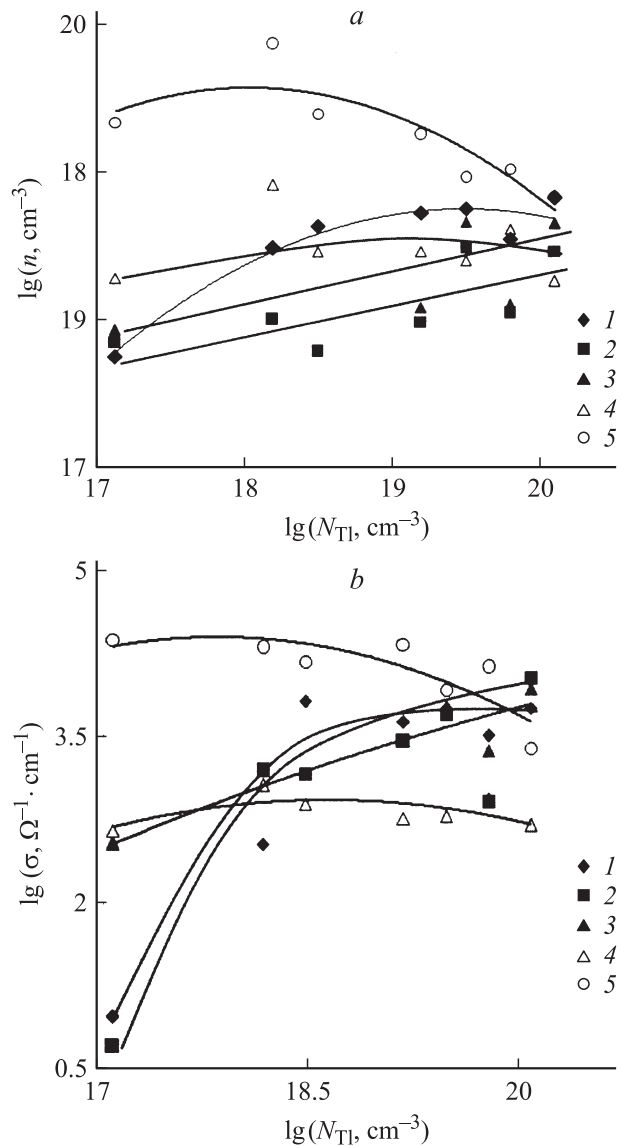


Рис. 2. Зависимости концентрации носителей заряда (а) и электропроводности (б) в монокристаллах РbТе от концентрации таллия при ~ 77 К. Кривые 1–5 относятся соответственно к образцу неотожженному и образцам, отожженным при 473, 573, 673, 873 К.

температур отжига 673 и 873 К при содержании Тl больше 0.01 ат% с ростом концентрации последнего σ и n уменьшаются.

Коэффициенты α и R образцов с примесью таллия, прошедших отжиг при 673 и 873 К при 77 К отрицательные. При этом знаки α и R для образцов, прошедших отжиг при 673 К, выше температуры 165–230 и 260–230 К (в зависимости от концентрации Тl) изменяются к положительным, а в случае отжига при 873 К во всем исследованном интервале температур знаки α и R отрицательные.

Зависимости $\sigma(T)$ для всех образцов PbTe с примесью Тl, прошедших отжиг выше 473 К, носят металлический характер.

Уменьшение σ и n образцов, прошедших термообработки при 673 и 873 К, с ростом концентрации Тl невозможно объяснить только самокомпенсацией примесей Тl. Поэтому для объяснения полученных результатов предполагается следующий механизм. При отжиге образцов параллельно снятию деформационных дефектов, возникающих при выращивании монокристаллов PbTe, происходит и образование новых вакансий в подрешетке теллура [9,10]. С ростом температур отжига этот процесс, т. е. процесс возникновения вакансий в подрешетке теллура, усиливается. Это приводит к тому, что с ростом температуры отжига концентрация вакансий в подрешетке Те растет. С ростом концентрации вакансий в подрешетке теллура растет и концентрация электронов в образце. Поэтому с термообработкой значения σ и n растут, $\sigma(T)$ приобретает металлический характер, а знаки α и R при низких температурах становятся отрицательными. С другой стороны, с ростом концентрации вакансий растет и вероятность образования электронейтральных (2 атома таллия с одной вакансией) или однократно заряженных (1 атом таллия с одной вакансией) комплексов типа (примесный атом)—вакансия. Оба процесса будут сопровождаться уменьшением концентрации электронов в образце и уменьшением значения σ при данной температуре. При этом, возможно, происходит и самокомпенсация примеси Тl. Однако, по-видимому, процесс образования электронейтральных или однократно заряженных комплексов примесь—вакансия превалирует над процессом самокомпенсации.

4. Заключение

Таким образом, выяснено, что значения электрических параметров образцов монокристаллов PbTe и характер зависимости этих параметров от температуры и концентрации примесей Тl, а также тип проводимости кристаллов (знаки α и R) существенно определяются температурой их предварительного отжига. Это объясняется тем, что с ростом температуры отжига растет концентрация двукратно заряженных вакансий в подрешетке теллура, приводящей к увеличению вероятности образования электронейтральных или однократно заряженных комплексов типа (примесный атом)—вакансия.

Список литературы

- [1] А.Н. Вейс, С.А. Немов, В.А. Половинкин, Ю.И. Уханов. ФТП, **11** (5), 669 (1977).
- [2] А.Н. Вейс, В.И. Кайданов, С.А. Немов, С.Н. Емелин, А.Я. Ксендзов, Ю.К. Шалабутов. ФТП, **13** (1), 185 (1979).
- [3] В.И. Кайданов, Р.Б. Мельник, С.А. Немов. ФТП, **13** (5), 1011 (1979).
- [4] В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, **26** (2), 201 (1992).
- [5] С.А. Немов, Ю.И. Равич. УФН, **168** (8), 817 (1998).
- [6] Л.И. Бытенский, В.И. Кайданов, Р.Б. Мельник, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, **14** (1), 74 (1980).
- [7] В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, **28** (3), 369 (1994).
- [8] Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогеидам свинца* PbTe, PbSe, PbS (М., Наука, 1968).
- [9] С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. *Материаловедение полупроводников и диэлектриков* (М., Металлургия, 1988).
- [10] Г.А. Ахмедова, Г.З. Багиева, З.Ф. Агаев, Д.Ш. Абдинов. ФТП, **43** (11), 1456 (2009).
- [11] З.Ф. Агаев, Э.М. Аллахвердиев, Г.М. Муртузов, Д.Ш. Абдинов. Неорг. матер., **39** (5), 543 (2003).
- [12] М.К. Жигинская, В.И. Кайданов, С.А. Немов, Л.А. Афанасьева. ФТП, **22** (11), 2043 (1988).
- [13] Л.И. Бытенский, В.И. Кайданов, Р.Б. Мельник, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, **15** (5), 981 (1981).
- [14] Л.И. Бытенский, В.И. Кайданов, В.П. Макеенко, Р.Б. Мельник, С.А. Немов. ФТП, **18** (3), 489 (1984).

Редактор Т.А. Полянская

Effect of annealing on electrical properties of the PbTe single crystals doped by thallium

G.A. Ahmedova, G.J. Abdinova, J. Sh. Abdinov

Abdullaev Institute of Physics,
National Academy of Sciences,
AZ-1143 Baku, Azerbaijan

Abstract It is found out, that values of the electric parameters of PbTe single crystals samples and dependence character of these parameters on temperature and concentration of Tl impurity, as well as on the type of the conductivity of crystals (a sing α and R) are essentially determined by the annealing temperature. It is explained, by the fact that with growth of the annealing temperature, concentration of the double charged vacancies in the tellurium sublattice, rises increasing a probability of formation of electroneutral or singly charged complexes of impurity atom—vacancy type.