

КОЭФФИЦИЕНТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАДМИЯ В КРИСТАЛЛАХ $Pb_{1-x}Cd_xTe$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

М. К. Шаров

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Поступила в редакцию 5.12.2024 г.

Аннотация. В настоящей работе найден коэффициент распределения (K) кадмия на границе расплава и твердой фазы в процессе направленной кристаллизации твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$.

Величина K играет важную роль, так как влияет на пространственную однородность электрофизических свойств кристаллов и характер фазовых диаграмм.

Синтез кристаллов твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ осуществлялся в вакуированных кварцевых ампулах путем взаимодействия расплавленных высокочистых элементарных компонентов при температуре 1100 °С, в течение 8 часов. После этого, кристаллы выращивались методом вертикальной направленной кристаллизации из расплава. Градиент температуры в области фронта кристаллизации составлял около 50 К/см. Скорость роста $\sim 0,3$ см/ч.

Общее (начальное) содержание кадмия в трех исследованных кристаллах $Pb_{1-x}Cd_xTe$ соответствовало $x = 0,0046$ (0,23 ат.%), $x = 0,0193$ (0,96 ат.%), $x = 0,0600$ (3,00 ат.%).

Фазовый анализ образцов, проведенный с помощью рентгеновской дифрактометрии, показал фазовую гомогенность всех кристаллов. Все рентгеновские пики твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ соответствовали фазе PbTe.

Концентрация кадмия измерялась методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА). Результаты ЛРСМА показали, что концентрация кадмия увеличивается от начальных участков роста кристаллов к конечным, что указывает на наличие зональной ликвации.

Следовательно, растворимость кадмия в расплаве выше, чем в твердой фазе. В процессе кристаллизации кадмий вытесняется в конечные области роста кристаллов. Можно заключить, что легирование теллурида свинца кадмием должно приводить к снижению температуры плавления.

Коэффициент распределения кадмия рассчитывался при численном решении уравнения Галливера-Пфанна.

В работе сделано допущение, что найденные величины коэффициента распределения кадмия близки к равновесному значению. Это возможно, если скорость направленной кристаллизации достаточно мала, а коэффициент диффузии примеси кадмия в расплаве достаточно велик.

По результатам анализа всех образцов установлено, что величина K находится в интервале: $0,52 \div 0,57$.

Ключевые слова: теллурид свинца, легированный кадмием, зональная ликвация, коэффициент распределения кадмия, твердые растворы.

Теллурид свинца – узкозонный полупроводник, являющийся одним из перспективных материалов для термоэлектрических генераторов энергии (ТЭГ) и инфракрасной (ИК) оптоэлектроники [1].

В системе Pb – Te образуется только одно соединение PbTe, плавящееся конгруэнтно при 924 °С [1, 2]. Теллурид свинца является двухфазной фазой, с узкой областью гомогенности. Максимальная ее протяженность наблюдается

при 775 °С от 49,994 до 50,013 ат.% теллура [1]. По другим данным от 49,98 до 50,04 ат.% теллура при 800 °С [3].

При затвердевании расплава стехиометрического состава вначале кристаллизуется теллурид свинца, обогащенный теллуром. Это связано с тем, что максимальной температурой плавления обладает теллурид свинца при избыточном содержании теллура 50.012 ат.% Te [4]. При избытке свинца PbTe имеет электронную проводимость, а при избытке теллура – дырочную.

Эти особенности фазовой диаграммы системы Pb – Te весьма усложняют синтез и выращивание кристаллов PbTe с заданными электрофизическими свойствами. Возникающие вакансии в подрешетке свинца обладают акцепторными свойствами, а вакансии в подрешетке теллура – донорными. Это приводит к тому, что кристаллы PbTe с отклонением от стехиометрии имеют высокую концентрацию свободных носителей заряда $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Лишь с использованием специальных технологических методов удастся уменьшить концентрацию свободных носителей заряда до $\sim 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [1, 5].

В настоящее время продолжают поиски легирующих примесей, введение которых оптимальным образом изменяет электрофизические свойства PbTe, повышая его термоэлектрическую добротность и эффективность ИК-оптоэлектронных приборов.

Многие гетеровалентные примеси в PbTe проявляют ярко выраженные донорные свойства (галогены) [6-12] или акцепторные свойства (щелочные металлы) [13-15]. При их введении могут достигаться высокие концентрации электронов или дырок [9-12], однако коэффициент Зеебека становится очень низким. Обычно такие примеси имеют очень малую растворимость [8, 13, 14].

В этой связи представляет интерес исследование примесей, близких по физико-химической природе к собственным элементам PbTe. Кадмий проявляет в соединении с теллуrom CdTe такую же степень окисления, как и свинец в PbTe. Оба соединения имеют гранецентрированную кубическую решетку с очень близкими периодами: $a_{\text{PbTe}} = 0,6462 \text{ нм}$, $a_{\text{CdTe}} = 0,6481 \text{ нм}$ (при комнатной температуре). Однако они относятся к разным пространственным группам симметрии: $Fm\bar{3}m$ и $Fd\bar{3}m$ соответственно. При высоком давлении CdTe переходит в структуру $Fm\bar{3}m$ с периодом 0,582 нм [16].

По этим причинам можно предположить, что поведение кадмия в матрице PbTe будет схожим с поведением изовалентных примесей. Он будет обладать существенно большей растворимостью по сравнению с гетеровалентными элементами, что даст возможность более надежно управлять электрофизическими свойствами твердых растворов, применяемых для создания ИК-оптоэлектронных приборов и термоэлектрических генераторов.

В работе [17] исследована фазовая диаграмма квазибинарного разреза PbTe – CdTe тройной системы Pb – Cd – Te. Обнаружено существование ограниченной области твердых растворов на основе

PbTe, которая зависит от температуры и составляет 3 мол.% CdTe при 523 К и 18 мол.% CdTe при 1073 К. Максимальная ширина области твердых растворов достигает 20 мол.% CdTe при 1139 К.

В работе [18] исследовалась микротвердость и плотность твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, принадлежащих квазибинарному разрезу PbTe – CdTe. Было установлено, что в закаленных после отжига при 943 К кристаллах $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, предельное содержание кадмия соответствует $x = 0.08$ (8 моль.% CdTe), что вполне согласуется с данными [17].

Из анализа зависимости периода решетки твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ от содержания кадмия [19], сделан вывод, что твердые растворы $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ относятся к растворам замещения, где примесь кадмия занимает регулярные узлы свинца.

Выращивание высококачественных монокристаллов твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ осложняется тем, что при увеличении концентрации легирующей примеси возрастает микродеформация кристаллической решетки. По данным работы [20], нелегированные образцы PbTe обладают наименьшим значением микродеформации – 0,16 %, а в кристаллах твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, при $x = 0,08$, микродеформация достигает 0,30 %.

Очень важной причиной пространственной неоднородности электрофизических свойств легированных кристаллов является ликвация – это химическая неоднородность, возникающая в твердом растворе в процессе кристаллизации, вследствие различной растворимости примеси в жидкой фазе и в растущей твердой фазе. При этом состав кристаллов, полученных в начале затвердевания, может существенно отличаться от состава последних порций кристаллизующегося расплава.

Ликвация, проявляющаяся в объеме отдельных зерен (кристаллитов, дендритов), называется внутрикристаллической дендритной ликвацией. Если химическая неоднородность наблюдается в объеме всего кристалла (слитка), то такая ликвация называется зональной. Степень ликвации определяется коэффициентом распределения, который выражается через отношение концентрации примеси в твердой фазе C_s к концентрации примеси в расплаве C_L на межфазной границе: $K = C_s/C_L$. Если эта величина меньше единицы, то примесь в процессе направленной кристаллизации оттесняется в жидкую фазу. Тогда конечные участки роста кристалла становятся более обогащенными примесью. И наоборот, если коэффициент распределения больше единицы, то примесь в процессе направленной кристаллизации преимущественно захватывается растущим кри-

сталлом, тогда конечные участки роста кристалла становятся обедненными примесью. В итоге, кристаллы, выращенные методом направленной кристаллизации с легирующей примесью, коэффициент которой отличен от единицы, имеют неравномерное распределение примеси вдоль оси роста, а значит различные участки кристалла обладают неодинаковыми электрофизическими свойствами.

Кроме того, коэффициент распределения определяет характер фазовой диаграммы: если $K < 1$, то примесь понижает температуру плавления основного компонента, а если $K > 1$, то повышает. В случае $K = 1$, примесь не влияет на температуру плавления основного компонента и в процессе направленной кристаллизации распределяется равномерно вдоль оси роста кристалла.

Следует отметить, что истинное (равновесное) значение коэффициента распределения может несколько отличаться от измеренной (эффективной) величины. В первую очередь это зависит от скорости направленной кристаллизации и коэффициента диффузии примеси в расплаве. Если скорость направленной кристаллизации достаточно низкая, а коэффициент диффузии примеси достаточно велик, то эффективный коэффициент распределения приближается к равновесной величине.

Целью настоящей работы является определение коэффициента распределения примеси кадмия в кристаллах $Pb_{1-x}Cd_xTe$, выращенных методом направленной кристаллизации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ проводился в кварцевых вакуированных ампулах из навесок элементарных компонентов, в качестве которых использовались реактивы корпорации Sigma-Aldrich высокой степени чистоты: металлический свинец 99,9995%, металлический кадмий 99,999%, теллур элементарный 99,999%. Металлический свинец и кадмий были подвергнуты механическому очищению от поверхностного оксидного слоя. Для синтеза отбирались только крупные частицы теллура (не менее 1-3 мм в диаметре) с целью снижения количества кислорода, вносимого совместно с оксидным слоем на поверхности.

Кварцевые ампулы промывались в концентрированном растворе HNO_3 и HF (3:1 по объему), затем в дистиллированной воде и сушились при 800 °С с дальнейшим охлаждением в эксикаторе. Ампулы с шихтой откачивались до остаточного давления 10^{-3} Па и выдерживались при данном уровне вакуума на протяжении 1 ч.

Синтез твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ проводился путем сплавления компонентов в жидком состоянии при температуре 1100 °С продолжительностью 8 часов, после чего кристаллы выращивались методом направленной кристаллизации в вертикальной двузонной трубчатой печи. Температурный градиент в районе фронта кристаллизации составлял около 50 К/см. Скорость выращивания была около 0,3 см/ч. Длина полученных цилиндрических образцов составляла 7÷15 мм. Вдоль оси роста кристаллов наносились насечки острой стальной иглой с интервалом 2 мм. Содержание кадмия в образцах измерялось в районе насечек методом локального рентгеноспектрального микроанализа при помощи приставки INCAx-sight для сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6380LV.

Контроль фазового состава образцов проводился с помощью рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-4-07.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общее (начальное) содержание кадмия в трех исследованных кристаллах $Pb_{1-x}Cd_xTe$ соответствовало $x = 0,0046$ (0,23 ат.% Cd), $x = 0,0193$ (0,96 ат.% Cd), $x = 0,0600$ (3,00 ат.% Cd). Все исследованные образцы твердых растворов имели концентрацию кадмия, не превышающую его растворимость по данным работ [17, 18]. Для примера на рис. 1 показаны результаты анализа элементного состава методом ЛРСМА для конечного участка роста кристалла с начальным содержанием кадмия 0,23 ат.%.

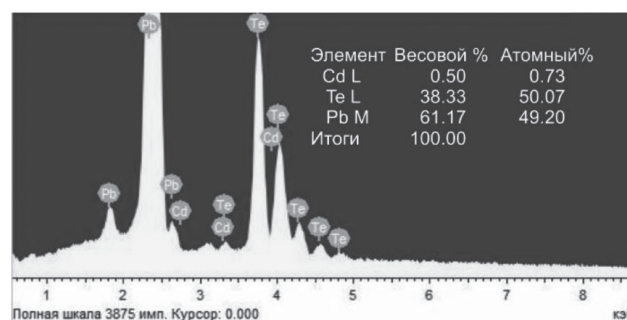


Рис. 1. Спектр характеристического рентгеновского излучения и элементный состав, полученный методом ЛРСМА для конечного участка роста кристалла твердого раствора $Pb_{1-x}Cd_xTe$ с начальным содержанием кадмия 0,23 ат.%.

Дифрактограммы всех образцов выращенных кристаллов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ содержали рефлексы, характерные только для фазы PbTe, что подтверждает их фазовую однородность и принадлежность к твердым растворам. При введении кадмия в PbTe наблюдается смещение рентгеновских рефлексов в

сторону увеличения углов дифракции, что указывает на уменьшение периода решетки. В работе [19] показано, что период решетки твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$ уменьшается по мере увеличения содержания кадмия.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные и расчетные кривые распределения концентрации кадмия в кристаллах $Pb_{1-x}Cd_xTe$ вдоль оси роста. Как видно из этого рисунка, концентрация кадмия возрастает от начальных участков роста кристаллов к конечным. Это означает, примесь кадмия в $PbTe$ оттесняется в жидкую фазу в процессе направленной кристаллизации, следовательно, растворимость кадмия в жидкой фазе выше, чем в твердой, т.е. $K < 1$. Кроме того, из этого факта можно сделать вывод, что примесь кадмия в $PbTe$ должна понижать температуру плавления основного вещества, что согласуется с известной фазовой диаграммой квазибинарного разреза $PbTe - CdTe$ [17].

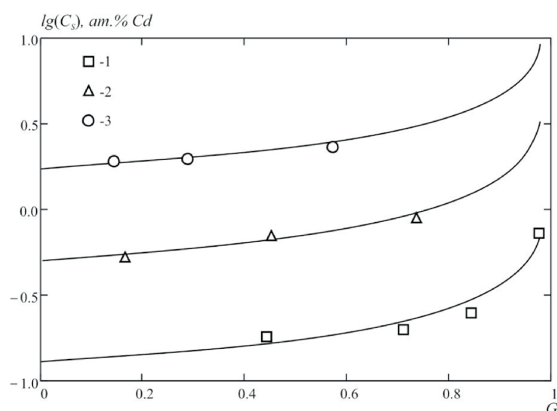


Рис. 2. Концентрация кадмия C_s в кристаллах $Pb_{1-x}Cd_xTe$ в зависимости от доли закристаллизованного вещества G в процессе направленной кристаллизации при различной начальной концентрации кадмия в расплаве: 1 – $C_0 = 0.23$ ат.%, 2 – $C_0 = 0.96$ ат.%, 3 – $C_0 = 3.00$ ат.%. Точки – эксперимент, кривые – расчет по уравнению (1).

Величину K можно найти из известного уравнения Галливера-Пфанна:

$$C_s(G) = C_0 K (1 - G)^{K-1}, \quad (1)$$

где $C_s(G)$ – концентрации кадмия в кристалле в точке G , C_0 – начальная концентрация кадмия в расплаве, G – доля закристаллизованного вещества.

Расчет коэффициента распределения кадмия в уравнении (1) проводился по методу наименьших квадратов, при известных величинах $C_s(G)$ и C_0 . В результате получены три достаточно близкие величины коэффициента распределения кадмия K для всех трех исследованных образцов твердых растворов $Pb_{1-x}Cd_xTe$, выращенных из расплавов с различ-

ной начальной концентрацией кадмия: при $C_0 = 0.23$ ат.%, $K = 0.56$; при $C_0 = 0.96$ ат.%, $K = 0.52$; при $C_0 = 3.00$ ат.%, $K = 0.57$. Как видно из рис. 2, расчетные кривые, построенные по уравнению Галливера-Пфанна, хорошо ложатся на экспериментальные точки при найденных величинах коэффициента распределения кадмия.

Следует отметить, что в соответствии с уравнением (1), при значениях G очень близких к 1, величина $C_s(G)$ стремиться к бесконечности, что противоречит физическому смыслу. Это означает, что данное уравнение нельзя применять к самым конечным участкам роста кристаллов. По этой причине, расчеты коэффициентов распределения примеси кадмия в $PbTe$ проводились для начальных и средних участков роста кристаллов, а самые конечные участки из расчетов исключались.

Итак, величина коэффициента распределения кадмия в твердых растворах $Pb_{1-x}Cd_xTe$, выращенных методом направленной кристаллизации, находится в интервале $K = 0.52 \div 0.57$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрикосов Н.Х. Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$ / Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шелимова. – Москва : Наука, 1975. – 195 с.
2. Зломанов В.П. Р-Т-х диаграммы состояния систем металл-халькоген / В.П. Зломанов, А.В. Новоселова. – Москва : Наука, 1987. – 207 с.
3. Elliott R.P. Constitution of Binary Alloys. First Supplement / R.P. Elliott. – New York : McGraw Hill Book Co., 1965. – 362 p.
4. Brebriek R.F. Composition Stability Limits of $PbTe$ / R.F. Brebriek, K.S. Allgaier // J. Chem. Phys. – 1960. – Vol. 32. – № 6. – P. 1826-1832.
5. Равич Ю.И. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам $PbTe$, $PbSe$, PbS / Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. – Москва: Наука, 1968. – 383 с.
6. Кайданов В.И. Особенности самокомпенсации донорного действия галогенов в теллуриде свинца / В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич, А.Ю. Дереза // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19, – № 10. – С. 1857-1860.
7. Кайданов В.И., Немов С.А., Равич Ю.И. Самокомпенсация электрически активных примесей собственными дефектами в полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ / В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич // Физика и техника полупроводников. – 1994. – Т. 28, – № 3. – С. 369-393.
8. Шаров М.К., Яценко О.Б., Угай Я.А. Микро-твердость и плотность твердых растворов $PbTe_{1-x}X_x$,

(Х - Cl, Br, I) / М.К. Шаров, О.Б. Яценко, Я.А. Угай // Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42. – № 7. – С. 800-802.

9. Шаров М.К. Электрофизические свойства твердых растворов $\text{PbTe}_{1-x}\text{I}_x$, исследованные методом инфракрасного отражения / М.К. Шаров // Перспективные материалы. – 2008. – № 2. – С. 39-42.

10. Шаров М.К. Концентрация свободных электронов и удельная электропроводность теллурида свинца, легированного хлором / М.К. Шаров // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 12. – С. 37-39.

11. Шаров М.К. ИК-спектры отражения в области плазменного резонанса твердых растворов $\text{PbTe}_{1-x}\text{Br}_x$ / М.К. Шаров // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45. – № 8. – С. 1021-1024.

12. Шаров М.К., Яценко О.Б., Самойлов А.М. Электрофизические свойства монокристаллов теллурида свинца, легированного бромом / М.К. Шаров, О.Б. Яценко, А.М. Самойлов // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 7. – С. 77-79.

13. Прокофьева Л.В. Электронный спектр и рассеяние носителей тока в $\text{PbTe}(\text{Na} + \text{Te})$ / Л.В. Прокофьева, Д.А. Пшеная-Северин, П.П. Константинов, А.А. Шабалдин // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – № 9. – С. 1195-1198.

14. Алексеева Г.Т. Роль дефектов в акцепторном легировании полупроводников типа PbTe элементами I группы / Г.Т. Алексеева, Б.Г. Земсков, П.П. Константинов, Л.В. Прокофьева, К.Т. Уразбаева // Физика и техника полупроводников. – 1992. – Т. 26, – № 2. – С. 358-367.

15. Житинская М.К., Колодка С.В., Немов С.А. Явления переноса в $\text{p-PbTe}(\text{Ag,Na})$ / М.К. Житинская, С.В. Колодка, С.А. Немов // Физика и техника полупроводников. – 1990, – Т. 24. – № 2. – С. 292-294.

16. Чижилов Д. М. Теллур и теллуриды / Д. М. Чижилов, В. П. Счастливый. – Москва: Наука, 1966. – 280 с.

17. Rosenberg A.J. Solid solutions of CdTe and InTe in PbTe and SnTe / A.J. Rosenberg, R. Grierson, J.C. Woolley, P. Nicolic // Trans. Met. Soc. AIME. – 1964. – Vol. 230. – № 2. – Р. 342-349.

18. Шаров М.К. Растворимость кадмия в теллуриде свинца / М.К. Шаров // Журнал неорганической химии. – 2010. – Т. 55. – № 7. – С. 1190-1193.

19. Шаров М.К. Параметр кристаллической решетки твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ / М.К. Шаров // Вестник Воронежского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 65-68.

20. Шаров М.К. Влияние легирования кадмием на микродеформацию кристаллической решетки PbTe / М.К. Шаров // Перспективные материалы. – 2009. – № 3. – С. 30-32.

*Воронежский государственный университет
Шаров Михаил Константинович, к.х.н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем*

E-mail: sharov-mk@mail.ru

*Voronezh State University
Sharov Mikhail K., PhD, Associate Professor of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystem*

E-mail: sharov-mk@mail.ru

SEGREGATION COEFFICIENT OF CADMIUM IN $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ CRYSTALS GROWN BY ORIENTED CRYSTALLIZATION

M. K. Sharov

Voronezh State University

Abstract. In this paper, the segregation coefficient (K) of cadmium at $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ solid solutions was researched. The volume of K is important, because it affects on the spatial homogeneity of electrophysical properties and the nature of phase diagrams. The synthesis of crystals of $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ solid solutions was carried out in evacuated quartz ampoules by the interaction of molten high-purity elementary components at a temperature of 1100 °C for 8 hours. After that, the crystals were grown by vertical oriented crystallization from the melt. The temperature gradient in the region of the crystallization front was about 50 K/cm. The growth rate was ~ 0.3 cm/h. The total (initial) cadmium concentration in the three $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ crystals corresponded to $x = 0.0046$ (0.23 at.%), $x = 0.0193$ (0.96 at.%), $x = 0.0600$ (3.00 at.%).

The phase analysis of the samples, carried out using X-ray diffractometry, showed phase homogeneity of all crystals. All X-ray peaks of $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ solid solutions corresponded to the PbTe phase.

The cadmium concentration was measured by electron probe micro analysis (EPMA). The EPMA results showed that the cadmium concentration increases from the initial to the final sections of crystal

growth. Therefore, the solubility of cadmium in the melt is higher than in the solid phase, and during crystallization, the cadmium is displaced into the final regions of crystal growth. It can be concluded that alloying lead telluride with cadmium should lead to a decrease in the melting temperature. The cadmium segregation coefficient was calculated by the Galliver-Pfann equation.

In this research, it is assumed that the found values of the cadmium segregation coefficient are close to the equilibrium value. This is possible if the rate of unidirectional crystallization is slow enough, and the diffusion coefficient of cadmium impurity in the melt is large enough.

Based on the analysis of all samples, it was found that the K value is in the range: $0.52 \div 0.57$.

Keywords: cadmium-doped lead telluride, zonal liquation, cadmium segregation coefficient, solid solutions.

REFERENCES

1. Abrikosov N.H. Poluprovodnikovye materialy na osnove soedinenij $A^{IV}B^{VI}$ / N.H. Abrikosov, L.E. Shelimova. – Moskva : Nauka, 1975. – 195 s.
2. Zlomanov V.P. R-T-h diagrammy sostojanija sistem metall-hal'kogen / V.P. Zlomanov, A.V. Novoselova. – Moskva : Nauka, 1987. – 207 s.
3. Elliott R.P. Constitution of Binary Alloys. First Supplement / R.P. Elliott. – New York : McGraw Hill Book Co., 1965. – 362 s.
4. Brebriek R.F. Composition Stability Limits of PbTe / R.F. Brebriek, K.S. Allgaier // J. Chem. Phys. – 1960. – Vol. 32. – № 6. – P. 1826-1832.
5. Ravich Ju.I. Metody issledovanija poluprovodnikov v primenenii k hal'kogenidam PbTe, PbSe, PbS / Ju.I. Ravich, B.A. Efimova, I.A. Smirnov. – Moskva: Nauka, 1968. – 383 s.
6. Kajdanov V.I., Nemov S.A., Ravich Ju.I., Dereza A.Ju. Osobennosti samokompensacii donornogo dejstvija galogenov v telluride svinca // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 1985. – Vol. 19, – № 10. – S. 1857-1860.
7. Kajdanov V.I., Nemov S.A., Ravich Ju.I. Samokompensacija jelektricheski aktivnyh primesej sobstvennymi defektami v poluprovodnikah tipa $A^{IV}B^{VI}$ / V.I. Kajdanov, S.A. Nemov, Ju.I. Ravich // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 1994. – T. 28, – № 3. – S. 369 -393.
8. Sharov M.K., Jacenko O.B., Ugaj Ja.A. Mikrotverdst' i plotnost' tverdyh rastvorov $PbTe_{1-x}X_x$, (X – Cl, Br, I) / M.K. Sharov, O.B. Jacenko, Ja.A. Ugaj // Neorganicheskie materialy. – 2006. – T. 42. – № 7. – S. 800-802.
9. Sharov M.K. Jelektrofizicheskie svojstva tverdyh rastvorov $PbTe_{1-x}I_x$, issledovannye metodom infrakrasnogo otrazhenija / M.K. Sharov // Perspektivnye materialy. – 2008. – № 2. – S. 39-42.
10. Sharov M.K. Koncentracija svobodnyh jelektronov i udel'naja jelektroprovodnost' tellurida svinca, legirovannogo hlorom / M.K. Sharov // Poverhnost', rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija. – 2009. – № 12. – S. 37-39.
11. Sharov M.K. IK-spektry otrazhenija v oblasti plazmennogo rezonansa tverdyh rastvorov $PbTe_{1-x}Br_x$ / M.K. Sharov // Neorganicheskie materialy. – 2009. – T. 45. – № 8. – S. 1021-1024.
12. Sharov M.K. Jelektrofizicheskie svojstva monokristallov tellurida svinca, legirovannogo bromom / M.K. Sharov, O.B. Jacenko, A.M. Samojlov // Poverhnost', rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija. – 2010. – № 7. – S. 77-79.
13. Prokof'eva L.V. Jelektronnyj spektr i rassejanie nositelej toka v $PbTe(Na + Te)$ / L.V. Prokof'eva, D.A. Pshenaj-Severin, P.P. Konstantinov, A.A. Shabaldin // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 2009. – T. 43. – № 9. – S. 1195-1198.
14. Alekseeva G.T. Rol' defektov v akceptornom legirovanii poluprovodnikov tipa PbTe jelementami I grupy / G.T. Alekseeva, B.G. Zemskov, P.P. Konstantinov, L.V. Prokof'eva, K.T. Urazbaeva // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 1992. – T. 26, – № 2. – S. 358-367.
15. Zhitinskaja M.K., Kolodka S.V., Nemov S.A. Javlenija perenosa v p-PbTe(Ag,Na) / M.K. Zhitinskaja, S.V. Kolodka, S.A. Nemov // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 1990, – T. 24. – № 2. – S. 292-294.
16. Chizhikov D. M. Tellur i telluridy / D. M. Chizhikov, V. P. Schastlivyj. – Moskva: Nauka, 1966. – 280 s.
17. Rosenberg A.J. Solid solutions of CdTe and InTe in PbTe and SnTe / A.J. Rosenberg, R. Grierson, J.C. Woolley, P. Nicolice // Trans. Met. Soc. AIME. – 1964. – Vol. 230. – № 2. – P. 342-349.
18. Sharov M.K. Rastvorimost' kadmija v telluride svinca / M.K. Sharov // Zhurnal neorganicheskoy himii. – 2010. – T. 55. – № 7. – S. 1190-1193.
19. Sharov M.K. Parametr kristallicheskoj reshetki tverdyh rastvorov $Pb_{1-x}Cd_xTe$ / M.K. Sharov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2011. – № 1. – S. 65-68.
20. Sharov M.K. Vlijanie legirovanija kadmijem na mikrodeformaciju kristallicheskoj reshetki PbTe / M.K. Sharov // Perspektivnye materialy. – 2009. – № 3. – S. 30-32.