

$$\rho(x, y) = 7.599 \text{ г/см}^3 - 0.34x + 0.663y - 2.52xy, \quad (3)$$

где  $7.599 \text{ г/см}^3$  — теоретическая плотность  $PbS$  при комнатной температуре.

Выражение (3) описывает реальную плотность кристаллов в области кубической модификации для исследованных образцов с точностью порядка 0,5% и выше. В совокупности с выражениями (1), (2) оно может быть применено для экспрессопределения состава исследуемых материалов косвенным путем.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] З а я ч у к Д.М., С т а р и к П.М. // ФТП. Т. 14. В. 3. С. 526-528.
- [2] H a r i k o s h i Y., K a w a s h i m a M., S a i t o H. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. V. 20. N 12. L897-L900.
- [3] Г а р а с и м В.И., Д р а п а к З.Т., З а я ч у к Д.М., и др. // Изв. АН СССР Неорганич. матер. 1985. Т. 21. № 6. С. 910-913.
- [4] А б р и к о с о в Н.Х., Ш е л и м о в а Л.Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений  $A^4B^6$ . М.: Наука, 1975. 195 с.
- [5] Количественный электронно-зондовый микроанализ. / Под ред. В. Скота, Г. Лава. М.: Мир. 1986. 352 с.

Черновицкий государственный университет

Поступило в Редакцию  
20 апреля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 23

12 декабря 1990 г.

06.3

© 1990

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ РАСПЛАВ-ТВЕРДОЕ ТЕЛО  
ПРИ ЖФЭ СИНТЕЗЕ  $A^3B^5$  СОЕДИНЕНИЙ ИЗ  
„ИНЕРТНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ“ (НА ПРИМЕРЕ  
СИСТЕМ:  $Pb-InAs-InSb$  И  $Bi-Ga-GaAs$ )

А.М. Г р е б е н ю к, С.И. К р у к о в с к и й,  
А.М. Л и т в а к, Н.А. Ч а р ы к о в,  
Ю.П. Я к о в л е в

Под „инертным растворителем“ ( $S$ ) в дальнейшем будем понимать компонент расплава, который при проведении ЖФЭ не включается в твердую фазу в макроколичествах (условно примем верхний предел концентрации включения  $10^{20}$  частиц/см<sup>3</sup>, что отвечает

мольной доле  $Y \approx 0.005$ ). Примером таких „инертных растворителей“ для  $A^3B^5$  соединений являются элементы 1У группы основной подгруппы -  $Pb, Sn$ . Таким же свойством обладает и  $Bi$  (У группа, основная подгруппа) за исключением систем с  $InSb$ . Основным признаком инертности растворителя ( $S$ ) - образование со всеми полупроводниковыми компонентами системы простых эвтектических бинарных подсистем  $S-A^3B^5$ .

С термодинамической точки зрения при расчете диаграмм плавкости в таких системах учитывать включение  $S$  в твердую фазу нет необходимости, т.к. вклад этого эффекта пренебрежимо мал. Вместе с тем, выращивание бинарных  $A^3B^5$  из инертных растворителей продемонстрировало существенное изменение концентрации свободных носителей заряда (удельного сопротивления) в эпислоях, что было связано с изменением концентрации и типа структурных дефектов.

В качестве примера приведем данные по концентрации носителей заряда с эпислоях, полученных ЖФЭ из  $Pb$  расплавов - для  $InAs$   $n \approx 10^{15}-10^{16}$  см $^{-3}$  (данные авторов), для  $GaSb$   $\rho \approx 10^{14}-10^{15}$  см $^{-3}$  [1], в то время как при получении из индиевых и галлиевых расплавов синтезируются эпислой со значениями  $n \approx 10^{16}-10^{17}$  см $^{-3}$ ,  $\rho \approx 10^{16}-10^{17}$  см $^{-3}$ .

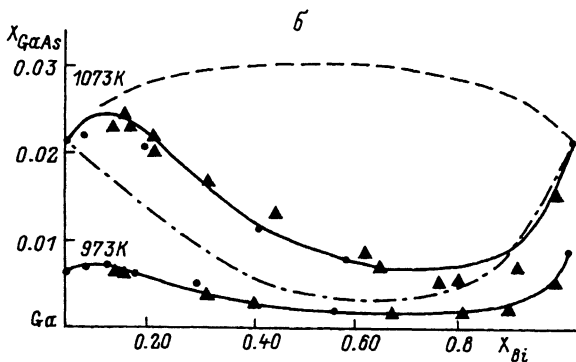
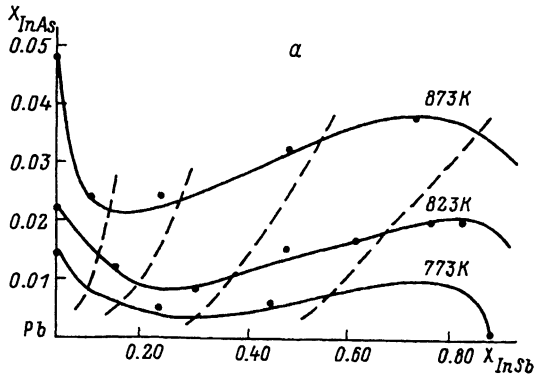
Целью работы является экспериментальное изучение и разработка метода термодинамического расчета фазовых равновесий в трехкомпонентных системах типа  $A^3B^5$  - инертный растворитель.

## Э к с п е р и м е н т а л ь н ы е   д а н н ы е

Анализ немногочисленных литературных данных по фазовым равновесиям расплав-твердое тело в трехкомпонентных системах [2-4], а также проведение наших собственных экспериментов в системах:  $Pb - InAs - InSb$ ,  $Pb - GaAs - GaSb$ ,  $Pb - InSb - GaSb$ ,  $Bi - Ga - GaAs$ , выявило уникальную особенность в поведении изотерм ликвидуса в полях кристаллизации индивидуальных  $A^3B^5$  или твердых растворов на их основе. Изотермы ликвидуса во всех системах с „инертным растворителем“ имеют выраженный  $S$ -образный ход, который не встречается в прочих  $A^3B^5$  системах.

В качестве примера на рисунке, а приведен фрагмент диаграммы плавкости системы с одним инертным растворителем и двумя растворенными  $A^3B^5$  -  $Pb - InAs - InSb$  (\*), а на рисунке, б - диаграммы плавкости системы с двумя растворителями (один из которых инертен) и одним растворенным  $A^3B^5$  -  $Bi - Ga - GaAs$ (\*\*). Там же представлены литературные [2] (система (\*\*)) и наши данные (по обеим системам; система (\*) изучалась впервые). Эксперимент проводился методом изотермического насыщения из подложки-источника - монокристаллических пластин  $InAs$  (\*),  $GaAs$  (\*\*).

Как видно из рисунка, в системах  $S - (A^3B^5) - (A^3B^5)$ ,  $S^1 - S^2 - (A^3B^5)$  наблюдается  $S$ -образный характер изотерм ликвидуса. Этот факт экспериментально наблюдается для всех известных нам систем указанного выше типа.



Изотермы ликвидуса в системе  $Pb - InAs - InSb$ : сплошная линия – расчет, кружки – экспериментальные данные (авторы), пунктирные линии – изоконцентраты  $InAs$  в твердой фазе (а).  
 Изотермы ликвидуса в системе  $Bi - Ga - GaAs$ : сплошная линия – расчет, пунктирная линия – расчет ( $QRSM$ ), пунктирно-точечная линия – расчет ( $RASM$ ), кружки – экспериментальные данные (авторы), треугольники – данные работы [2] (б).

### Данные термодинамического расчета

В силу трудоемкости изучения в широкой области температур и концентраций диаграмм плавкости систем, необходимых для проведения ЖФЭ, принципиальным является прогноз на основании термодинамической модели.

Покажем, что наиболее используемая для  $A^3B^5$  систем модель квазирегулярных растворов ( $QRSM$ ) в принципе непригодна к описанию систем с  $S$ -образными изотермами ликвидуса даже качественного. Возьмем, например, систему  $Bi - Ga - GaAs$ . Из условия фазового равновесия следует, что при движении вдоль изотермы ликвидуса в точках экстремума (при  $d\chi_{GaAs}/d\chi_{Bi} = 0$ ) справедливо соотношение:  $\partial\mu_{GaAs}/\partial\chi_{Bi} = 0$  при  $T, \chi_{GaAs} = const$ ,

где  $\mu_i, X_i$  - химический потенциал и мольная доля  $i$ -го компонента в расплаве. Для *QRSM* с температурно зависимыми параметрами неидеальности ( $\alpha_{i-j}$ ) отсюда получаем:

$$\frac{X_{Ga}}{X_{Bi}} = \frac{[\alpha_{GaAs-Bi} + \alpha_{Ga-Bi} - \alpha_{Ga-GaAs}]}{[\alpha_{GaAs-Bi} + \alpha_{Ga-Bi} + \alpha_{Ga-GaAs}]}$$

Таким образом, все рассчитанные по *QRSM* экстремумы должны принадлежать секущей, исходящей из фигуративной точки *GaAs*. Наличие более чем одного экстремума противоречит тогда условию термодинамической устойчивости жидкой фазы. Движению вдоль секущей отвечает изотермическое добавление в расплав *GaAs*; при этом для устойчивой фазы справедливо  $\partial \mu_{GaAs} / \partial n_{GaAs} > 0$  ( $n_{GaAs}$  - число молей *GaAs*), а на всей изотерме ликвидуса  $\mu_{GaAs} = const$ . Поскольку *QRSM* является моделью термодинамически согласованной, противоречить критерию устойчивости она не может, значит, на расчетной изотерме не может быть более одного экстремума. Таким образом, *QRSM* непригодна к описанию наших систем. Пример расчета по модели *QRSM* приведен на рисунке, б.

Аналогичный результат получается и при анализе модели идеальных ассоциированных растворов.

Пример расчета по модели регулярно ассоциированных растворов *RASM* [2] (см. рисунок, б) также неудачен, хотя анализ показывает принципиальную возможность описания *S*-образных изотерм. Очевидно, обескураживающий результат прогноза [2] связан с крайне неудачным выбором параметров *RASM*. С другой стороны, применение этой модели (из-за упрощающего решение некорректного учета ассоциации) нарушает условие химического равновесия для реакций образования димеров, поэтому применение ее также нежелательно.

Мы предлагаем использовать для расчета нашу модель, основанную на вириальном разложении Гиббса по мольным долям компонентов, [5, 6] (основанную на учете всех возможных двух- и трехчастичных взаимодействий в расплаве), которая ранее была успешно применена для широкого класса *A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>* систем [5-8]. Примеры расчета, хорошо описывающего эксперимент, также приведены на рисунке, б.

Аналогичный результат получен и для систем с двумя растворителями (см., например, рисунок, а).

## В ы в о д ы

В настоящей работе сообщается об экспериментальном изучении и термодинамическом расчете фазовых равновесий расплав-твердое тело в тройных системах, возникающих при ЖФЭ полупроводников *A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>* из инертных растворителей.

- [1] Баранов А.Н., Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Тимченко И.М., Чугуева З.И., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1989. Т. 23. № 5. С. 780-783.
- [2] Якушева Н.А., Чикичев С.И. // Изв. АН СССР, Сер. Неорг. матер. 1987. Т. 23. № 10. С. 1607-1609.
- [3] Hall R.W. // J. Electrochem. Soc. 1963. V. 110. N 5. P. 385-388.
- [4] Jordan A.C. // Met. Trans. B. 1976. V. 7. N 6. P. 191-202.
- [5] Гусейнов А.А., Джуртанов Б.Е., Литвак А.М., Мирсагатов М.Е., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письмо в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 12. С. 67-73.
- [6] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Литвак А.М., Сяврис С.В., Чарыков Н.А. // ЖНХ. 1990. Т. 35. № 4. С. 1020-1023.
- [7] Баранов А.Н., Литвак А.М., Моисеев К.Д., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ЖПХ. 1990. Т. 63. № 5. С. 976-981.
- [8] Баранов А.Н., Литвак А.М., Моисеев К.Д., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В. // ЖФХ. 1990. Т. 64. № 6. С. 1651-1654.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
5 октября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 23

12 декабря 1990 г.

05.4; 05.2

© 1990

## ВОЛНЫ ДЕЙМОНА-ЭШБАХА В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ПОКРЫТИЕМ

Ю.И. Б е с п я т ы х, А.Д. С и м о н о в,  
В.Д. Х а р и т о н о в

1. В связи с проблемой использования уникальных свойств высокотемпературных металлпроксидных сверхпроводников (СП) Проблема для целей спинволновой электроники весьма актуальна задача о влиянии СП на спектр магнитостатических волн в ферромагнетике (ФМ). Взаимодействие объемных магнитостатических волн с