

PbS проявляя те же самые собственные дефекты, что и в спектрах  $\alpha(\hbar\omega)$  сильно компенсированного сульфида свинца, а именно  $V_{\text{cb}}$ . Новые экспериментальные данные не только хорошо согласуются с результатами [6], но и существенно их дополняют. В частности, они позволяют уточнить величину энергетического зазора  $\Delta E$  между термами  $E_1$  и  $E_2$  вакансии халькогена при 0 К. Оказалось, что в PbS величина  $\Delta E$  не превышает 20 мэВ. Полученный результат соответствует данным теоретического исследования энергетического спектра вакансий халькогена, выполненного авторами [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Н. С. Беспалова, А. Н. Вейс, З. М. Дашевский. ФТП, 21, 946 (1987).
- [2] А. Н. Вейс, А. Ю. Рыданов, Н. А. Суворова. ФТП, 27, 701 (1993).
- [3] Б. А. Волков, О. А. Панкратов. ЖЭТФ, 88, 280 (1985).
- [4] Л. И. Бытенский, В. И. Кайданов, Р. Б. Мельник, С. А. Немов, Ю. И. Равич. ФТП, 14, 74 (1980).
- [5] В. И. Кайданов, С. А. Немов, Р. Б. Мельник, А. И. Зайцев, О. В. Жуков. ФТП, 20, 859 (1986).
- [6] А. Н. Вейс. Р. Ю. Крупицкая, А. В. Лумер. ФТП, 22, 1514 (1988).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

### ГЛУБОКИЕ СОСТОЯНИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ , ЛЕГИРОВАННЫХ ГАЛЛИЕМ

Ю. К. Выграненко, В. В. Слынько, Е. И. Слынько

Институт проблем материаловедения Академии наук Украины, 274001, Черновцы, Украина  
(Получено 24 февраля 1993 г. Принято к печати 26 марта 1993 г.)

Соединения  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  и их твердые растворы кристаллизуются со значительным отклонением от стехиометрии, и равновесная концентрация электрически активных собственных дефектов составляет  $10^{18}$ — $10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ . Понизить концентрацию свободных носителей вплоть до собственной стало возможным лишь при легировании элементами III группы [1].

Изучение фазовой диаграммы системы Pb—Ga—Te вблизи PbTe позволило установить, что кроме обычных областей с электронной и дырочной проводимостью имеется область с собственной проводимостью [2]. Стабилизированное положение уровня Ферми в PbTe:Ga находится посредине запрещенной зоны [2], что позволяет получать высокоомные образцы, обладающие высокой фоточувствительностью при низких температурах [3]. Однако в твердых растворах  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{Ga}$  в интервале составов, соответствующих  $0.19 < x < 0.30$  [4], а также при  $x = 0.06, 0.1, 0.18, 0.3$  [5] высокоомное состояние не обнаружено.

Цель настоящей работы — определение области составов ( $x$ ) твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{Ga}$ , степени их легирования ( $N_{\text{Ga}}$ ) и отклонения от стехиометрии в сторону Te ( $z$ ), обеспечивающих получение кристаллов с концентрацией носителей, близкой к собственной.

Нами исследованы электрические свойства твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ ), легированных галлием в количестве  $N_{\text{Ga}} = 0.2$  и  $0.4$  ат%. Кристаллы получены сплавлением исходных компонентов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}_{1+\delta}$  ( $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ ) и GaTe в вакуумированных кварцевых ампулах при заданном отклонении

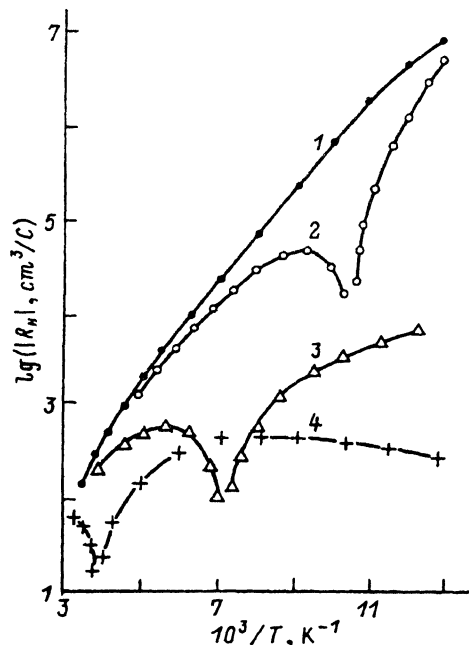


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла в твердых растворах  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ : Ga различного состава.  $x$ : 1—0.02, 2—0.04, 3—0.06, 4—0.08.  $z$ : 1—0, 2—4—0.002.  $N_{Ga}$ , ат%: 1—0.2, 2—4—0.4.

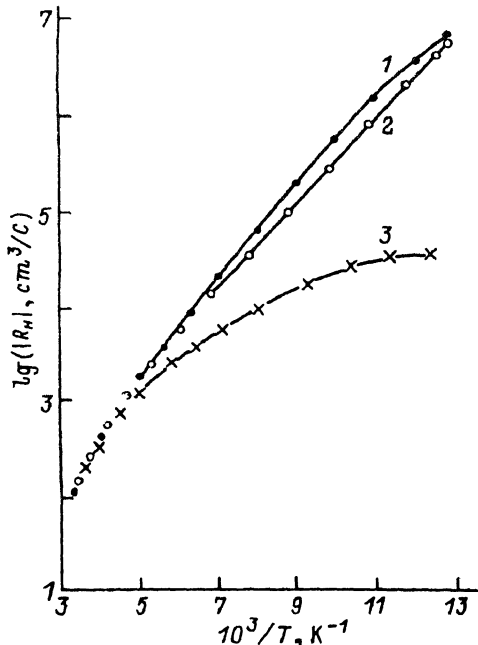


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла в образцах  $Pb_{0.98}Sn_{0.02}Te$ : Ga.  $z$ : 1, 3—0; 2—0.001.  $N_{Ga}$ , ат%: 1—0.2, 2, 3—0.4.

от стехиометрии в сторону теллура ( $0 < z < 0.006$ ). Последующий гоменизирующий отжиг проводился при температуре 873 К.

Исследования эффекта Холла (в поле  $H = 1.5T$ ) и электропроводности проводились в интервале температур  $77 \div 300$  К в криостате, обеспечивающем полную экранировку образца от фонового излучения. После снятия нарушенного слоя электрохимической полировкой образцы имели размеры  $8 \times 1.8 \times 0.4$  мм.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента Холла  $R_H$  от температуры для образцов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ : Ga различного состава.

Образцы стехиометрического состава ( $z = 0$ ) при  $x = 0.02$  и  $N_{Ga} = 0.2$  ат% (кривая 1) имеют  $n$ -тип проводимости во всем температурном интервале; концентрация электронов при 77 К составляет  $7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , удельное сопротивление  $\rho \approx 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . При  $x = 0.04$ ,  $z = 0.002$  и  $N_{Ga} = 0.4$  ат% проводимость образцов в области низких температур становится дырочной; концентрация дырок составляет  $p = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $\rho \approx 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Инверсия знака коэффициента Холла наблюдается при  $T_{inv} = 96$  К (кривая 2). С увеличением содержания Sn до  $x = 0.06$  и  $0.08$   $T_{inv}$  смещается в область более высоких температур. Концентрация дырок при 77 К увеличивается соответственно до  $8.4 \cdot 10^{14}$  и  $2.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (кривые 3 и 4).

Из приведенных результатов следует, что наиболее низкие концентрации носителей заряда получены на образцах с  $x = 0.02$  и  $0.04$ . Дальнейшие исследования проводились на образцах указанных составов при различных значениях  $N_{Ga}$  и  $z$ .

В соответствии с рис. 2 все образцы состава, соответствующего  $x = 0.2$ , при разных значениях  $N_{Ga}$  и  $z$  обладают проводимостью  $n$ -типа. Однако при одинаковых значениях  $x$  и  $z$  с увеличением степени легирования галлием от 0.2 до

0.4 ат% наблюдается рост концентрации электронов при 77 К от  $7 \cdot 10^{11}$  до  $1.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (кривые 1, 3) соответственно. В образцах с  $N_{Ga} = 0.4$  ат%, полученных с отклонением от стехиометрии  $z = 0.001$ , концентрацию электронов при 77 К удалось понизить до  $n \approx 10^{12}$  см<sup>-3</sup> (кривая 2).

Образцы состава, соответствующего  $x = 0.04$ , при различных параметрах  $N_{Ga}$  (0.2 и 0.4 ат%) и  $z$  ( $0 \leq z \leq 0.006$ ) сохраняют дырочный тип проводимости в области низких температур. На всех образцах обнаружена инверсия знака коэффициента Холла. С увеличением  $z$  от 0.002 до 0.006 растет как температура инверсии  $T_{inv}$  (от 95 до 140 К), так и концентрация дырок при 77 К (от  $1.4 \cdot 10^{12}$  до  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>). Наиболее низкие концентрации носителей при 77 К получены в образцах с  $N_{Ga} = 0.2$  ат% при  $z = 0$  и в образцах с  $N_{Ga} = 0.4$  ат% при  $z = 0.002$ ;  $p = 6 \cdot 10^{11}$  и  $1.4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> соответственно.

Значения энергии активации, рассчитанные по наклону зависимостей  $\lg(nT^{-3/2}) = f(10^3/T)$  для твердых растворов с  $x = 0.02$  и  $0.04$  при  $N_{Ga} = 0.2$  ат% и  $z = 0$ , составляют соответственно  $E_c = -0.085$  и  $E_c = -0.096$  эВ.

На основании вышеприведенных результатов можно сделать следующие выводы. Характер температурной зависимости  $\lg|R_H| = f(10^3/T)$  твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xTe : Ga$  (наличие инверсии знака  $R_H$  и тип проводимости) определяется главным образом составом: т. е.  $x$ ; достигается  $Pb_{1-x}Sn_xTe : Ga$  с концентрацией носителей, близкой к собственной, получение соответствующим подбором параметров  $x$ ,  $N_{Ga}$  и  $z$ ; высокоомное состояние связано с образованием глубокого уровня, который движется в направлении к валентной зоне при увеличении содержания олова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. И. Кайданов, Ю. И. Равич. УФН, 145, 96 (1985).
- [2] Г. С. Бушмарина, Б. Ф. Грузинов, И. А. Дабкин, Е. Я. Лев, Б. Я. Мойжес, С. Г. Супрун. Изв. АН СССР. Неорг. матер., 23, 222 (1987).
- [3] С. А. Белоконь, Л. Н. Верещагина, И. И. Иванчик, Л. И. Рябова, Д. Р. Хохлов. ФТП, 26, 264 (1992).
- [4] Б. А. Акимов, Н. Б. Брандт, Л. И. Рябова, Д. Р. Хохлов, С. М. Чудинов, О. Б. Яценко. Письма ЖЭТФ, 31, 304 (1980).
- [5] Г. С. Бушмарина, Б. Ф. Грузинов, Т. Т. Дедегкаев, И. А. Дабкин, Т. Б. Жукова, Е. Я. Лев. Изв. АН СССР. Неорг. матер., 16, 2136 (1980).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

### АМОРФНЫЙ ГИДРИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ, ЛЕГИРОВАННЫЙ ДИСПРОЗИЕМ

Г. С. Куликов, М. М. Мездрогина, С. К. Першеев, К. П. Абдурахманов

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получено 21 января 1993 г. Принято к печати 26 марта 1993 г.)

Аморфный гидрированный кремний ( $a\text{-Si:H}$ ) находит применение в электронике при производстве солнечных элементов и ряда других полупроводниковых приборов. Электрофизические свойства  $a\text{-Si:H}$  в существенной мере определя-