

## ОСОБЕННОСТИ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА В PbTe, ЛЕГИРОВАННОМ ОДНОВРЕМЕННО Tl И Si

Немов С. А., Житинская М. К., Прошин В. И.

Исследованы коэффициенты удельной электропроводности, Холла, Зеебека и поперечного эффекта Нернста—Эттингсгаузена в PbTe, легированном одновременно глубоким акцептором Tl и изовалентной примесью Si, в диапазоне температур 77—430 К.

Содержание таллия было фиксированным — 2 ат%, кремния варьировалось от 0 до 1.5 ат%. Все образцы были *p*-типа.

Образцы PbTe(Tl, Si) с малым ( $N_{Si} < 0.08$  ат%) и высоким ( $N_{Si} \geq 0.7$  ат%) содержанием кремния обладали электрофизическими свойствами, близкими к свойствам PbTe(Tl). Для образцов с промежуточным содержанием Si характерны аномальное поведение кинетических коэффициентов и стабилизация концентрации дырок на уровне  $1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, на порядок меньше, чем в PbTe, легированном только таллием.

Отмеченные особенности в кинетических коэффициентах связываются с существованием квазилокального уровня  $\epsilon_d$ , расположенного приблизительно на 0.1 эВ ниже потолка валентной зоны и резонансного рассеяния дырок на этот уровень. Предполагается, что этот уровень генетически связан с собственными дефектами донорного типа.

В ряде работ, посвященных изовалентному легированию полупроводников  $A^{III}B^V$  [1] и  $A^{IV}B^{VI}$  [2], показано, что введение изовалентной примеси в металлическую подрешетку оказывает существенное влияние на ансамбль собственных дефектов кристаллической решетки и сопровождается появлением ее электрической активности. Полученные результаты открывают новые возможности в создании полупроводниковых материалов с необходимыми свойствами и структурой. В частности, введение небольшого (~1 ат%) количества изовалентной примеси олова в PbSe и PbS, легированных глубоким акцептором Na ( $N_{Na} \sim 1$  ат%), сопровождается резким снижением (на несколько порядков) концентрации дырок в валентной зоне [2]. Авторы [2, 3] связывают этот эффект с проявлением электрической активности атомов Sn.

Аналогичные результаты были получены при изовалентном легировании указанных выше соединений примесью Ge [4]. Однако при изовалентном легировании PbTe оловом [5] и германием [6] подобных ярких эффектов не наблюдается.

В настоящей работе приведены результаты исследования явлений переноса в PbTe, легированном одновременно глубоким акцептором Tl и изовалентной примесью Si. Технология приготовления образцов была подобна использованной в работах [2–6]. Содержание примеси таллия было постоянным и составляло 2 ат%, количество примеси кремния, вводимого в расплав шихты, варьировалось в пределах от 0 до 2 ат%. Микрорентгеновский анализ подтвердил наличие кремния в исследованных образцах.

Были измерены коэффициенты удельной электропроводности  $\sigma$ , Холла  $R$ , Зеебека  $S$  и поперечного эффекта Нернста—Эттингсгаузена  $Q$  в диапазоне температур 77—450 К. Все исследованные образцы обладали дырочной проводимостью. Концентрация дырок  $p$  определялась из значения коэффициента Холла при температуре 77 К, измеренного в магнитном поле 1.6 Тл.

Анализ полученных данных показал, что по электрофизическим свойствам исследованные образцы можно условно разделить на три группы (рис. 1).

I. Образцы с малым содержанием кремния ( $N_{Si} \leq 0.08$  ат%) и концентрацией дырок вблизи  $1 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

II. Образцы с  $N_{Si} \approx 0.1 - 0.7$  ат% и  $p = (8 \div 16) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

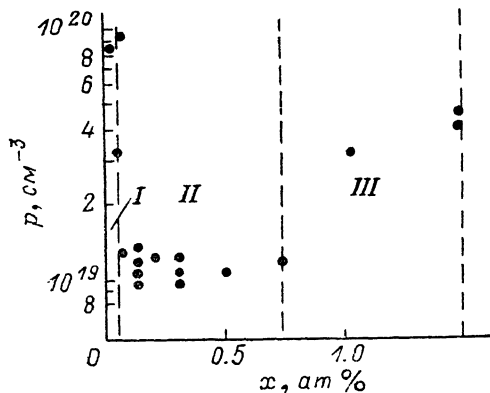


Рис. 1. Зависимость холловской концентрации дырок  $p$  при 77 К от количества введенной примеси кремния  $N_{Si}$  для твердого раствора  $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$ .

III. Образцы с высоким содержанием кремния  $N_{Si} \geq 0.7$  ат% и  $p \geq 3 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Сопоставление электрофизических свойств образцов  $PbTe\langle Tl, Si \rangle$  со свойствами образцов  $PbTe$ , легированных Tl [7], при одинаковых холловских

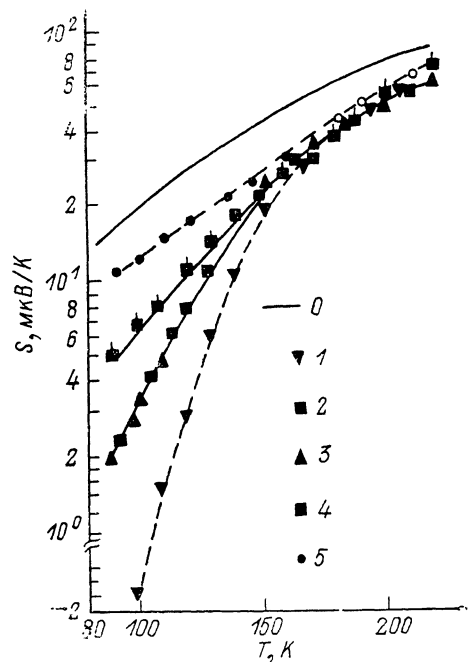
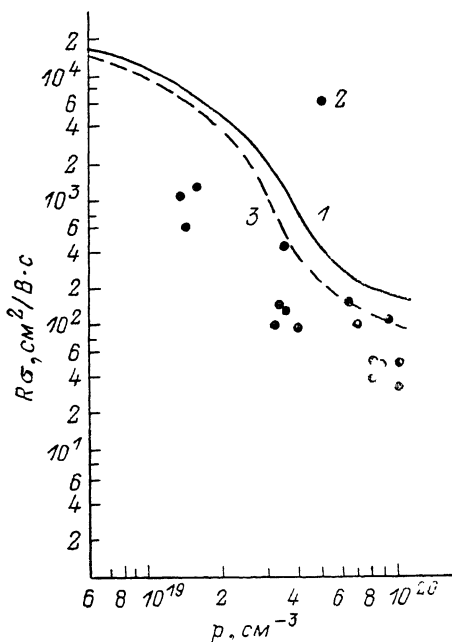


Рис. 2. Концентрационная зависимость холловской подвижности дырок в твердом растворе  $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$  при 77 К.

1 — результаты из [7] для  $PbTe\langle Tl \rangle$ , 2 — наши данные, 3 — расчетная кривая для сечения рассеяния дырок на атомах кремния  $S = 6 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>.

Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Зеебека в твердом растворе  $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$  для образцов II группы.

$x$ , ат% ( $p_{77}$ ,  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>): 1 — 0.1 (1.6); 2 — 0.3 (1.02); 3 — 0.7 (1.3); 4 — 0.2 (1.5); 5 — 0.5 (1.2); 1 — 0 (1.3).

концентрациях дырок  $p$  показало, что кинетические коэффициенты в образцах I и III групп и в  $PbTe\langle Tl \rangle$  имеют близкие численные значения и подобные температурные и концентрационные зависимости. Более того, в образцах с концентрацией дырок  $p \approx 1 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> и минимальным содержанием кремния наблюда-

ется переход в сверхпроводящее состояние при критической температурой  $T_c \sim 1$  К [8].

Вместе с тем в образцах с Si наблюдается снижение холловской подвижности  $R_H$  при низких температурах, которое связано с дополнительным рассеянием на примеси кремния. Оценка сечения рассеяния дырок на примеси кремния, сделанная из величины снижения подвижности при 77 К, дала величину порядка  $(2 \div 6) \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

Наибольший интерес представляют данные для образцов II группы. Для них характерны стабилизация концентрации дырок на уровне  $p \approx 1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> (пиннинг уровня Ферми) и значительные различия в кинетических коэффициентах по сравнению с образцами PbTe<Tl, при той же концентрации дырок при 77 К. В образцах с Si наблюдается также дополнительное снижение подвижности по сравнению с образцами I и III групп (рис. 2), уменьшение вплоть до смены знака

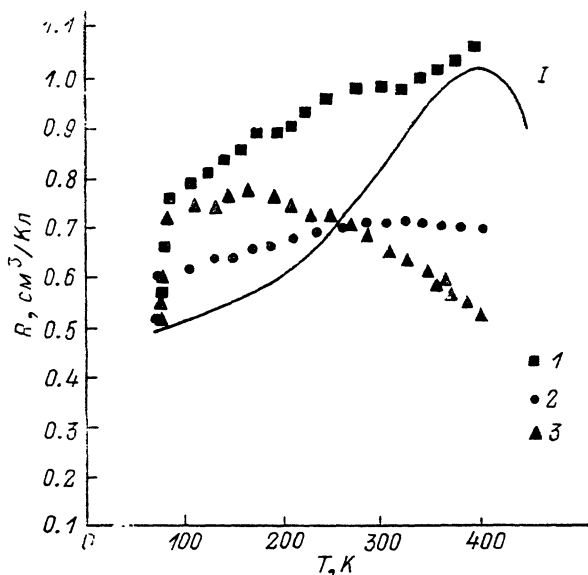


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента Холла  $R(T)$  для образцов  $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$ .  
 $x$ , ат% ( $p_{77}$ ,  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>): 1 — 0.3 (1.02); 2 — 0.5 (1.25); 3 — 0.7 (1.3); I — 0 (1.3).

коэффициента Зеебека  $S$  при низких температурах (рис. 3), сильное влияние состава образцов на температурную зависимость коэффициента Холла  $R(T)$  (рис. 4).

Отмеченные особенности характерны для кристаллов  $A^{IV}B^{VI}$  с резонансными уровнями, расположенными на фоне разрешенного спектра электронных состояний [7]. Поэтому мы их связываем с существованием квазилокального уровня  $\epsilon_d$ , расположенного приблизительно на 0.1 эВ ниже потолка валентной зоны (что соответствует положению уровня Ферми при низких температурах в образцах II серии), и резонансного рассеяния дырок на этот уровень.

В настоящее время трудно дать обоснованное заключение относительно природы рассматриваемых резонансных состояний. С одной стороны, проблема примесных состояний и дефектов кристаллической решетки в полупроводниках  $A^{IV}B^{VI}$  далека от своего теоретического решения, с другой стороны, экспериментальных данных явно недостаточно для решения этого вопроса. Однако ясно, что рассматриваемый резонансный уровень нельзя связать с примесью кремния, поскольку в значительной части образцов II группы его содержание в 10 и более раз меньше концентрации таллия кремния и явно недостаточно для компенсации глубокого акцептора Tl и стабилизации концентрации дырок на уровне  $1 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Нельзя исключить, что уровень  $\epsilon_d$  связан с примесью таллия. Однако нам представляется более вероятным, что рассматриваемые состояния

генетически связаны с собственными дефектами донорного типа, концентрация которых может существенно увеличиться за счет явления самокомпенсации, как это имело место в халькогенидах свинца с примесью галлия [<sup>9</sup>, <sup>10</sup>].

В заключение отметим, что, по-видимому, эти же состояния наблюдались в компенсированных образцах РbTe, легированных Tl и избытком Рb [<sup>11</sup>, <sup>12</sup>].

#### Список литературы

- [1] Бирюлин Ю. Ф., Гермогенов В. П., Отман Я. И., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В., Эпиктетова Л. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1118—1124.
- [2] Прокофьева Л. В., Виноградова М. Н., Зарубо С. В. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 11. С. 2201—2204.
- [3] Прокофьева Л. В., Зарубо С. В., Насрединов Ф. С., Серегин П. П. // Письма ЖЭТФ. 1981. Т. 33. В. 1. С. 14—16.
- [4] Вейс А. Н., Гурьева Е. А., Нефедов О. Г., Прокофьева Л. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1723—1726.
- [5] Кайданов В. И., Немов С. А., Зайцев А. М. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 268—271.
- [6] Житинская М. К., Немов С. А., Карпов А. А. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1589—1591.
- [7] Кайданов В. И., Равич Ю. И. // УФН. 1985. Т. 145. В. 1. С. 51—86.
- [8] Житинская М. К., Кайданов В. И., Немов С. А., Парфеньев Р. В., Шамшур Д. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. В. 4. С. 268—270.
- [9] Бытеский Л. И., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 1. С. 74—79.
- [10] Житинская М. К., Кайданов В. И., Немов С. А., Афанасьева Л. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 11. С. 2043—2045.
- [11] Кайданов В. И., Немов С. А., Мельник Р. Б., Зайцев А. М., Жуков О. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 5. С. 859—863.
- [12] Feit Z., Eger D., Zemel A. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 6. P. 3903—3909.

Ленинградский государственный  
технический университет

Получена 11.01.1991  
Принята к печати 28.01.1991