

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

Отмеченные особенности в кинетических коэффициентах связываются с существованием квазилокального уровня ϵ_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 AIII^{V} [1] и $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ [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 ($N_{\text{Na}} \sim 1$ 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 σ , 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 в шихте ($N_{Si} \leq 0.08$ ат%) и концентрацией дырок вблизи $1 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$.

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

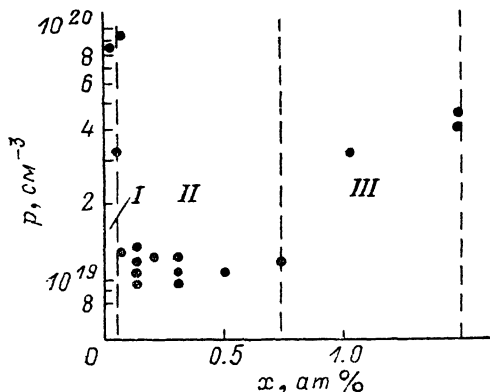


Рис. 1. Зависимость холловской концентрации дырок p при 77 К от количества введенной примеси кремния N_{Si} для твердого раствора $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$.

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

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

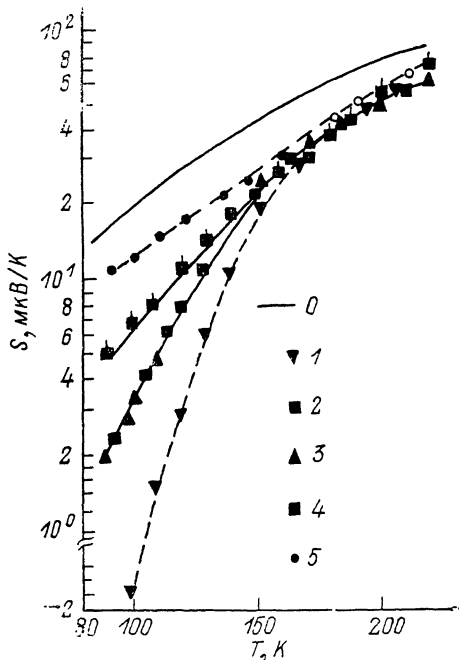
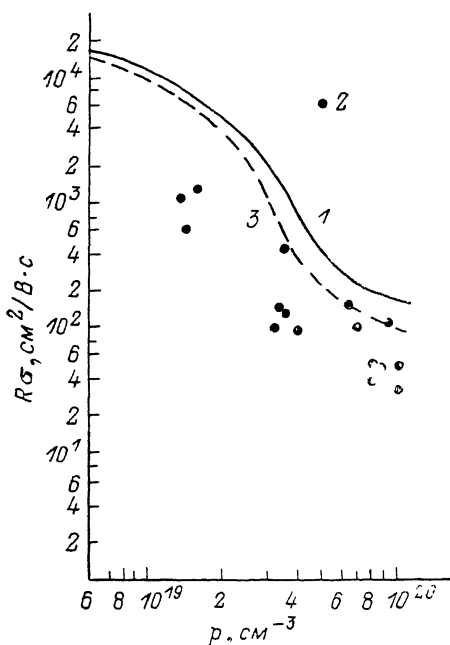


Рис. 2. Концентрационная зависимость холловской подвижности дырок в твердом растворе $Pb_{0.98-x}Tl_{0.02}Si_xTe$ при 77 К.

1 — результаты из [7] для $PbTe\langle Tl \rangle$, 2 — наши данные, 3 — расчетная кривая для сечения рассеяния дырок на атомах кремния $S = 6 \cdot 10^{-16}$ см 2 .

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 $^{-3}$): 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 $^{-3}$ и минимальным содержанием кремния наблюда-

ется переход в сверхпроводящее состояние с 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 $(2 \div 6) \cdot 10^{-16}$ см².

Наибольший интерес представляют данные для образцов II группы. Для них характерны стабилизация концентрации дырок на уровне $p \approx 1 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (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

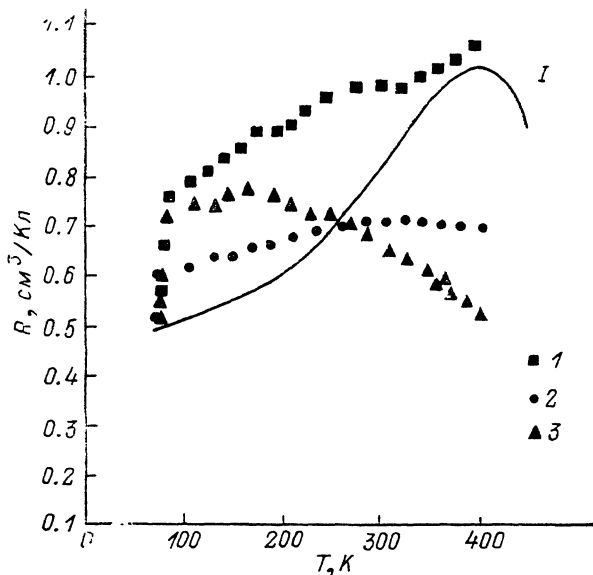


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента Холла $R(T)$ для образцов $\text{Pb}_{0.98-x}\text{Tl}_{0.02}\text{Si}_x\text{Te}$.
 x , ат% (p_{77} , 10^{19} см⁻³): 1 — 0.3 (1.02); 2 — 0.5 (1.25); 3 — 0.7 (1.3); I — 0 (1.3).

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 $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ с резонансными уровнями, расположенными на фоне разрешенного спектра электронных состояний [7]. Поэтому мы их связываем с существованием квазилокального уровня ϵ_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 $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ 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 и явно недостаточно для компенсации глубокого акцептора Tl и стабилизации концентрации дырок на уровне $1 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Нельзя исключить, что уровень ϵ_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 таллия [^{9, 10}].

В заключение отметим, что, по-видимому, эти же состояния наблюдались в компенсированных образцах PbTe, легированных Tl и избытком Pb [^{11, 12}].

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] Бытенский 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