

ного смещения появляются пробойные нелинейные явления. За время $t \approx 120$ ч дислокации блокируются — обратный ток ВАХ практически восстанавливается. Это происходит за счет насыщения оборванных связей дислокаций (уменьшения их электрической активности) и образования примесных атмосфер при уменьшении концентрации N_A в области p -типа проводимости (судя по ВФХ, в ~ 2 раза), при этом также увеличивается τ ННЗ. В дальнейшем ($t \approx 2 \cdot 10^3$ ч) (рис. 1, б, кривая 4) происходит прорастание дислокаций по активной области $n^+ - p$ -перехода; от места отпечатка индентора под действием упругих сил их плотность на $n^+ - p$ -переходе увеличивается. Примесные атмосферы таких дислокаций образуют эффективные шунтирующие связные каналы p^+ -типа проводимости [6]. При этом особенно значительно возрастает τ_n ННЗ, поскольку образующиеся p^+ -области не являются эффективными центрами рекомбинации для неосновных ННЗ, а, наоборот, выступают в роли барьеров, уменьшающих темп электрон-дырочной рекомбинации.

Изменения электрических и фотоэлектрических параметров индентированных структур не связаны с естественной деградацией, поскольку при аналогичных измерениях на контрольных образцах указанных изменений не наблюдалось.

В заключение можно сделать следующие выводы.

В результате экспериментальных данных можно предположить, что действие локальных механических напряжений на свойства $n^+ - p$ -переходов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ сводится в основном к следующему: 1) образованию дефектов типа дислокаций, которые в некоторой степени выступают в роли закороток $n^+ - p$ -перехода; 2) геттерному действию дислокаций и их блокированию примесными атмосферами с p^+ -типом проводимости; 3) прорастанию дислокаций и образованию связного канала токопротекания по примесным атмосферам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М., 1988. 256 с.
- [2] Гасан-заде С. Г., Сальков Е. А., Шепельский Г. А. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 11. С. 1913—1917.
- [3] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. Ч. 1. 456 с.
- [4] Андрухив М. Г., Вирт И. С., Цюцюра Д. И., Шуптар Д. Д., Шкумбатюк П. С. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1263—1266.
- [5] Вирт И. С., Дякин В. В., Любченко А. В., Коваль В. В., Цюцюра Д. И. // УФЖ. 1987. Т. 32. В. 5. С. 745—749.
- [6] Баранский П. И., Беляев А. Е., Городничий О. П., Комиренко С. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 121—125.

Дрогобычский государственный педагогический институт
им. И. Франко

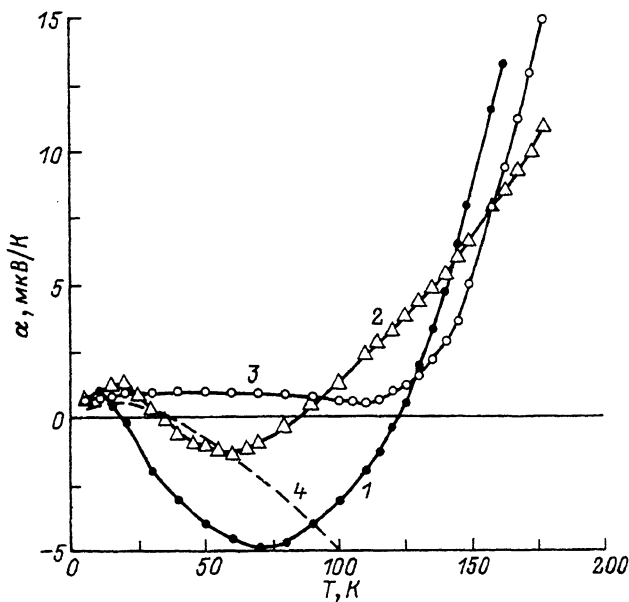
Получено 11.04.1991
Принято к печати 23.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ ТЕРМОЭДС PbTe(Tl)

Бойко М. П., Засавицкий Е. А.

Полупроводниковый сплав $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$ представляет особый интерес из-за наиболее ярко проявляющихся в нем эффектов, связанных с сильным резонансным рассеянием носителей в широкую примесную полосу. Кинетические коэффициенты определяются плотностью состояний, формой примесной полосы и относительным положением уровня Ферми [1]. Как известно, наиболее чувствительным к особенностям плотности состояний коэффициентом является термоэдс, что подтверждено подробными исследованиями [2]. Обобщенные в [3]



Температурная зависимость термоэдс нитевидных монокристаллов $Pb_{1-x}Tl_xTe$.

x (d , мкм): 1 — 0.0025 (53.6); 2 — 0.005 (50); 3 — 0.01 (45); 4 — теоретическая кривая, полученная из (3) в предположении $\sigma_1/\sigma_2 = 10$.

результаты относятся к свойствам образцов, полученных металлокерамическим способом, позволяющим получать макроскопически однородные материалы. Для отделения эффектов, связанных с микроскопической неоднородностью и сильным структурным несовершенством, необходимо исследование монокристаллических образцов. Однако изучение электрических свойств нитевидных монокристаллов $Pb_{1-x}Tl_xTe$ свидетельствует о возможном сильном макроскопически неоднородном распределении примеси [4] [проведенные нами микроструктурные исследования (LAMMA-анализ) подтвердили наличие радиальных и осевых неоднородностей]. Из-за наличия примесной полосы это может привести к сильным флуктуациям плотности состояний на уровне Ферми. В этом случае измерение термоэдс может быть наиболее чувствительным методом исследования.

В данной работе исследованы температурные зависимости (5 ÷ 200 K) термоэдс нитевидных монокристаллических образцов $Pb_{1-x}Tl_xTe$ (0.0025 < x < 0.03) диаметром 10 ÷ 100 мкм, полученных методом заполнения стеклянных капилляров расплавом исходного материала с последующей зонной перекристаллизацией [4]. В образцах составов $x = 0.0025, 0.005$ наблюдается двойная смена знака термоэдс (см. рисунок, кривые 1, 2). В нелегированных образцах и образцах с $x > 0.01$ термоэдс положительна во всем температурном интервале (кривая 3).

Смена знака термоэдс в зависимости от концентрации примеси при температурах выше азотной в теллуриде свинца, легированного таллием, была обнаружена ранее [2] и интерпретировалась в рамках особенностей резонансного рассеяния носителей. В предположении, что плотность состояний в примесной полосе описывается лоренцианом и резонансное рассеяние носителей является доминирующим, после простых вычислений для термоэдс получим

$$\alpha_{рез} = \frac{\pi^2 k_0}{2e} k_0 T \left(\frac{1}{\mu} + \frac{4}{3} \frac{\Delta}{\Delta^2 + (\Gamma/2)^2} \right), \quad (1)$$

где μ — химический потенциал, $\Delta = \epsilon_i - \mu$, ϵ_i — положение середины примесной полосы, Γ — ширина примесной полосы. Формула (1) справедлива для достаточно низких температур ($k_0 T \ll \Gamma$). Второй член в (1) является знакопеременным в

зависимости от положения уровня Ферми относительно середины примесной полосы. При $\Delta \leq 0$ знак термоэдс может стать аномальным, что наблюдалось в [2]. С повышением температуры ($k_0 T > \Gamma$) селективность рассеяния носителей уменьшается, что приводит к восстановлению нормального знака термоэдс. Однако, как следует из наших экспериментальных данных, кроме «высокотемпературной» смены знака термоэдс (для кривых 1, 2), в $\text{PbTe}(\text{Pb})$ имеется и «низкотемпературная». Отметим, что резонансное рассеяние носителей не является процессом активационного типа, т. е. при $k_0 T \ll \Gamma$ время релаксации не зависит от температуры ($\tau_{\text{рез}} = \text{const}$). Поэтому аномальное поведение термоэдс при низких температурах не может быть связано с особенностями резонансного рассеяния.

Рассмотрим возможные причины такого поведения термоэдс. Согласно теоретической работе [5], фононная термоэдс в отличие от диффузионной не чувствительна к виду энергетической зависимости времени релаксации носителей. Это наблюдалось в экспериментальных работах [6,7] в сильно легированном висмуте, в котором при низких температурах за счет влияния фононного увлечения восстанавливается нормальный знак термоэдс. С другой стороны, в [8] отмечалось наличие фононной компоненты в термоэдс теллурида свинца при $T < 20 \text{ K}$ ($p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Таким образом, причиной низкотемпературной смены знака термоэдс могло бы быть фононное увлечение. Однако в образцах теллурида свинца, легированного таллием, где концентрация носителей более чем на порядок больше, чем в образцах, исследованных в [8], фононное увлечение не может быть причиной смены знака термоэдс. Предположение о смешанном механизме рассеяния носителей также не позволяет объяснить немонотонную температурную зависимость термоэдс. Наиболее адекватное объяснение особенностей термоэлектрических свойств $\text{PbTe}(\text{Pb})$ можно дать на основе теории протекания в макроскопически неоднородных средах [9]. Макроскопически неоднородной можно считать среду, характерный размер неоднородностей в которой много больше длины свободного пробега в каждой из фаз. Под различными фазами в данном случае следует понимать области с различными значениями локальных кинетических коэффициентов. Отметим, что, как указывалось выше, для соединений $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ характерно макроскопически неоднородное распределение как компонент, так и легирующей примеси [10]. При этом размер характерных неоднородностей может достигать нескольких десятков микрон, что много больше длины свободного пробега носителей заряда.

Теория термоэлектрических свойств для произвольных трехмерно неоднородных сред не разработана [9]. Получение точных выражений в этом случае возможно только для специально сконструированных сред. Для проведения качественных оценок можно воспользоваться таким способом, представив нитевидный кристалл в виде радиально неоднородного цилиндра с концентрическим расположением фаз. Для квазидвумерной двухфазной нити с равной концентрацией фаз эффективная термоэдс приобретает довольно простой вид [11,12]

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \sqrt{\sigma_1 \kappa_1} + \alpha_2 \sqrt{\sigma_2 \kappa_2}}{\sqrt{\sigma_1 \kappa_1} + \sqrt{\sigma_2 \kappa_2}}. \quad (2)$$

При средней концентрации таллия в теллуриде свинца, близкой к началу заполнения примесной полосы, малые флуктуации в распределении примеси должны приводить к наличию областей с резко различающимися кинетическими коэффициентами, так как резонансное рассеяние носит ярко выраженный пороговый характер. Если в областях с уменьшенным содержанием примеси уровень Ферми находится вне примесной полосы, то значение кинетических коэффициентов в них практически не отличается от соответствующих значений в PbTe , легированном натрием, теллуrom и другими примесями. Тогда, приписав в (2) индекс 1 областям с допороговым содержанием примеси и индекс 2 областям с уровнем Ферми в примесной полосе, можно качественно описать вид температурной зависимости термоэдс. Так как в области низких температур теплопроводность носит в основном решеточный характер [8], малые флуктуации

содержания примеси (в соответствии с данными ЛАММА-анализа) не будут значительно сказываться на ее величине. Тогда в предположении $\kappa_1 \approx \kappa_2$

$$\alpha = \alpha_1 \left\{ 1 + \frac{4}{3} \frac{\mu\Delta}{\Delta_2 + (\Gamma/2)^2} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_1(0)}{\sigma_2(1+AT)}} \right)^{-1} \right\}, \quad (3)$$

где $\sigma_1(T) = \sigma_1(0)(1+AT)^{-1}$, A — экспериментальный коэффициент, определенный из температурных зависимостей $\sigma(T)$ для нестехиометрических нитей РbТе. На рисунке (кривая 4) приведена расчетная кривая, полученная из формулы (3). Расчетная кривая качественно воспроизводит вид температурных зависимостей термоэдс в области низких температур ($k_0T \ll \Gamma$), что свидетельствует, вероятно, о справедливости сделанных предположений. Представление о нитевидных кристаллах РbТе(Tl) как о макроскопически неоднородной среде хорошо согласуется с обнаруженным в таких нитях особым типом размерного эффекта [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кайданов В. И., Равич Ю. И. // УФН. 1985. Т. 145. В. 1. С. 51—86.
- [2] Вейс А. Н., Немов С. А. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1237—1240.
- [3] Немов С. А., Равич Ю. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 8. С. 1370—1374.
- [4] Бойко М. П., Гицу Д. В., Засавицкий Е. А. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 7. С. 1303—1305.
- [5] Варламов А. А., Панцулая А. В. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. В. 6. С. 2188—2196.
- [6] Бойко М. П., Редько Н. А., Родионов Н. А. и др. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. В. 1. С. 41—43.
- [7] Boiko M. P., Redko N. A. // Phys. St. Sol. (b). 1987. V. 140. P. K121—K124.
- [8] Регель Л. Л., Рахматов О. И., Редько Н. А. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. В. 4. С. 1242—1245.
- [9] Снарский А. А., Томчук П. М. // УФЖ. 1987. Т. 32. В. 1. С. 66—92.
- [10] Huang Yu., Debnam W. J., Fripp A. L. // Cryst. Growth. 1990. V. 104. N 2. P. 315—326.
- [11] Балагуров Б. Я. // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. В. 2. С. 665—671.
- [12] Балагуров Б. Я. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 10. С. 1870—1872.

Институт прикладной физики
АН Молдовы
Кишинев

Получено 20.05.1991
Принято к печати 23.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

РЕКОМБИНАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВАРИЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ МАГНИТОКОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Савицкий В. Г., Соколовский Б. С., Новак В. И.

Теоретически рассматривая закономерности магнитоконцентрационного эффекта (МКЭ) в варизонных полупроводниках (ВЗП), авторы работы [1] обратили внимание на перспективность использования ВЗП для создания нового типа источников излучения, работающих в условиях МКЭ. В недавно опубликованной работе [2] эта идея получила экспериментальное обоснование применительно к варизонному твердому раствору $Cd_xHg_{1-x}Te$. В настоящем сообщении приведены результаты расчета рекомбинационного излучения в ВЗП при МКЭ.