

- [7] Nouailhat A., Bremond G., Guillot G. // Semicond. Sci. Technol. 1986. V. 1. N 1. P. 275—279.
- [8] Zou Yuanxi, Zhou Jicheng, Lu Yian, Wang Kuangyu, Hu Binghua, Lu Bingfang, Li Cuncai, Li Liansheng, Shao Jiuan // Mater. XIII Int. Conf. Def. Semicond. / Ed. by L. C. Kimerling, J. M. Pursey. Colorado, California, 1984. P. 1021—1027.
- [9] Соболев М. М., Брунков П. Н., Конников С. Г., Степанова М. Н., Никитин В. Г., Улин В. П., Долбая А. Ш., Камушадзе Т. Д., Маисурадзе Р. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1058—1065.
- [10] Pons D., Bourgoin J. C. // J. Phys. C. 1985. V. 18. P. 3839—3871.
- [11] Martin G. M., Mitonneau A., Mircea A. // Electron. Lett. 1977. V. 13. N 7. P. 191—193.
- [12] Pons D., Mircea A., Bourgoin J. C. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 8. P. 4150—4157.

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

Получено 7.08.1990
Принято к печати 18.09.1990

ФТП, том 25, вып. 2, 1991

ВЛИЯНИЕ Tm НА СВОЙСТВА ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА

Акимов Б. А., Коробейникова Е. Н., Рябова Л. И., Тамм М. Е.

Использование редкоземельных (РЗЭ) элементов как легирующих добавок в PbTe и создание твердых растворов на основе теллурид свинца—теллурид РЗЭ позволяют изменять в широких пределах концентрацию носителей заряда, варьировать параметры энергетического спектра и магнитные характеристики исходного соединения $[1-3]$.

Сведений об использовании Tm как легирующей примеси и попытках синтезировать твердые растворы $Pb_{1-x}Tm_xTe$, насколько нам известно, до настоящего времени не имелось.

Для выбора условий роста монокристаллов $Pb_{1-x}Tm_xTe$ были исследованы растворимость тулия в теллуриде свинца по разрезу PbTe—TmTe, а также температура плавления сплавов в этой системе в области составов 0—13 мол% TmTe. В качестве шихты использовалась смесь теллурида свинца и монотеллурида тулия. TmTe представлял собой однофазный кристаллический слиток с параметром кубической ячейки $a = (6.33 \pm 0.03) \text{ \AA}$. Синтез TmTe осуществлялся по трехстадийной методике, описанной в работе [4].

Использованный для синтеза монокристаллический PbTe имел проводимость p -типа и концентрацию дырок $p \approx 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Полученные сплавлением поликристаллические образцы $Pb_{1-x}Tm_xTe$ отжигались при температуре 750 °С в течение 120 ч. С помощью рентгенодифрактометрического анализа установлено, что растворимость TmTe в PbTe не превышает 7—8 мол%.

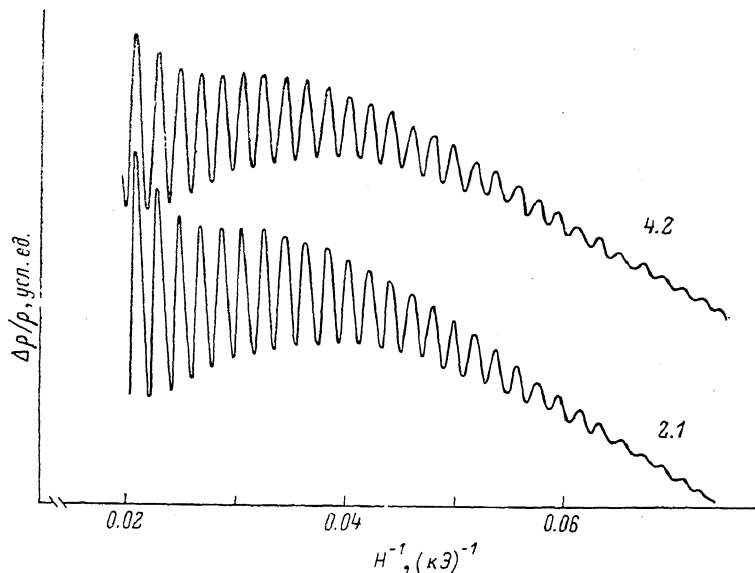
Синтез монокристаллов PbTe(Tm) осуществлялся методами направленной кристаллизации расплава (НК) и из пара по механизму пар—жидкость—кристалл (ПЖК). Все полученные образцы обладали проводимостью n -типа. Электрофизические параметры, определенные с помощью эффекта Холла, приведены в таблице. Содержание Tm в кристаллах установлено химическими аналитическими методами, ошибка анализа составляла 10 %.

Характеристики исследованных образцов ($T = 4.2 \text{ K}$)

№ образца	Метод синтеза	Состав шихты, вес%	C_{Tm} , ат%	$n, \text{ см}^{-3}$	ρ , Ом·см	$\mu = R \chi / \rho$, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
1	НК	95 % PbTe + 5 % TmTe	3	$4.8 \cdot 10^{20}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	60
2	ПЖК	То же	0.8	$1.6 \cdot 10^{19}$	$8.8 \cdot 10^{-6}$	$4.4 \cdot 10^4$
3	ПЖК	85 % PbTe + 10 % TmTe + 5 % Te	2.8	$1.0 \cdot 10^{19}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^4$
4	ПЖК + отжиг	То же	2.8	$3.0 \cdot 10^{18}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^4$

При использовании шихты одинакового состава (см. таблицу) в кристаллах, полученных методом НК, концентрация Тm оказывается существенно выше, чем в образцах, синтезированных из пара.

Для образца РbTe(Тm) 2 на рисунке показан вид осцилляций Шубникова — де-Гааза (ШГ) при двух значениях температуры — 2.1 и 4.2 К. Кривые записаны в ориентации $\mathbf{H} \parallel \langle 100 \rangle$ с точностью до 0.1° , что соответствует эквивалентному положению эллипсоидов, образующих поверхность Ферми в РbTe, относительно вектора магнитного поля \mathbf{H} . Юстировка образца осуществлялась с помощью специального поворотного устройства по методике, описанной в работе [5]. По периоду осцилляций в магнитном поле рассчитана концентрация носителей заряда $n_{\text{осц}} \approx 1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что близко к значению n_x (см. таблицу). По температурным зависимостям амплитуд осцилляций определена эффектив-



Вид осцилляций магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ для образца 2 РbTe(Тm).
Монотонная часть скомпенсирована. $\mathbf{H} \parallel \langle 100 \rangle$. Цифры у кривых — Т, К.

ная масса электронов $m_{100}^* \approx 7.7 \cdot 10^{-2} m_0$ (m_0 — масса свободного электрона). Расчет в рамках двухзонной модели с параметрами, взятыми для нелегированного РbTe (коэффициент анизотропии $\alpha = \sqrt{10.5}$; матричный элемент $v = 0.25 \times 10^8 \text{ см/с}$), дает значение $m_{100}^* \approx 8.4 \cdot 10^{-2} m_0$, $\epsilon_F \approx 100 \text{ мэВ}$. В пределах ошибки измерений ($\sim 15\%$) расчетное и экспериментальное значения эффективных масс совпадают. Это позволяет сделать вывод, что параметры энергетического спектра РbTe не претерпевают существенных изменений при введении Тm в количествах $< 1 \text{ ат}\%$.

Полученные данные интересно сравнить с результатами для РbTe(Cr) [5]. Как известно, в нелегированном РbTe, изменяя отклонение от стехиометрии, можно получить концентрацию электронов не выше $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Введение Cr, так же как и Тm, дает возможность увеличить n до $(1.3 \div 1.5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, оставаясь в пределах области гомогенности. Сравнивая осцилляционные кривые для образцов РbTe(Тm) и РbTe(Cr) с близкими значениями $\epsilon_F \sim 100 \text{ мэВ}$, можно отметить существенные различия. В РbTe(Cr) отчетливо наблюдается эффект удвоения частоты осцилляций в некотором магнитном поле H_z , что связано с проявлением магнитных свойств и изменением \tilde{g} -фактора электронов в магнитном поле. В отличие от РbTe(Тm) определение эффективных масс электронов по стандартной методике в РbTe(Cr) n -типа оказывается неприемлемым [5]. Разумеется, полученный результат не может однозначно свидетельствовать о том, что Тm в РbTe не проявляет себя как магнитоактивная примесь. Тонкие осцилляционные эффекты, связанные со спиновым расщеплением,

в PbTe(Tm) могут не наблюдаться из-за нетеплового уширения подуровней Ландау.

Синтез кристаллов с большим содержанием Tm из паровой фазы оказался возможным при использовании шихты нестехиометрического состава, поэтому образцы 3, 4, содержащие ~2.8 ат% Tm, по-видимому, являются сильно компенсированными. В процессе изотермического отжига степень компенсации изменяется, концентрация электронов понижается. В образце 4 на осцилляционных кривых спиновое расщепление наблюдалось достаточно отчетливо, однако особенностей, связанных с возможной зависимостью ξ -фактора от магнитного поля, также не обнаружено.

Суммируя полученные данные, можно охарактеризовать Tm в PbTe как донорную примесь, введение которой может увеличивать концентрацию электронов до $\geq 10^{20}$ см⁻³. Сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии стабилизации положения уровня Ферми (УФ) в PbTe(Tm) затруднительно. С одной стороны, наличие образцов с $n \geq 10^{20}$ см⁻³, где концентрация электронов приблизительно соответствует концентрации введенной примеси C_{Tm} , свидетельствует о том, что «химическая» стабилизация УФ не наблюдается. Однако не исключено, что в PbTe(Tm) эффект насыщения на зависимости n (C_{Tm}) имеет место в некотором узком диапазоне C_{Tm} , как, например, наблюдается в PbTe(Ga) [6]. Довольно высокие подвижности электронов и наличие осцилляций в образцах с $n \approx 1.6 \cdot 10^{19}$ см⁻³ вблизи характерной энергии стабилизации ϵ_F в сплавах PbTe(Cr) могут быть связаны с существованием некоего квазилокального уровня в энергетическом спектре, обусловленного кластерами типа собственный дефект кристаллической решетки + примесный атом. При исследовании осцилляций ШГ не обнаружено каких-либо проявлений магнитных взаимодействий Tm со свободными электронами, что является подтверждением вывода авторов работы [7] о малости обменного интеграла взаимодействия электронов зоны проводимости с магнитными моментами примесных атомов в теллуриде свинца.

Список литературы

- [1] Partin D. L. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 15. P. 1997—1999.
- [2] Averoc M., Lombos B. A., Fac C. // Phys. St. Sol. 1985. V. 131. P. 759—763.
- [3] Krost A., Harbecke B., Faymonville R., Schlegel H., Faunter E. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. P. 2119—2143.
- [4] Ярембаш Е. И., Елисеев А. А. Халькогениды редкоземельных элементов. М., 1975. 258 с.
- [5] Акимов Б. А., Вергелецкий П. В., Зломанов В. П., Рябова Л. И., Тананаева О. И. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 2. С. 244—249.
- [6] Кайданов В. И., Равич Ю. И. // УФН. 1985. Т. 145. В. 1. С. 51—86.
- [7] Засавицкий И. И., Сазонов А. В. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 6. С. 1669—1674.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получено 26.04.1990
Принято к печати 25.09.1990

ФТП, том 25, вып. 2, 1991

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ННЗ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ ПРИ СИЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Пятраускас М., Норейка Д., Нятикшис В., Банайтис А.

В последнее время в связи с бурным развитием технологии микроэлектроники актуальными являются работы по исследованию поведения плазмы ННЗ высокой концентрации ($\Delta N \geq 10^{19}$ см⁻³) в полупроводниковых материалах как во времени, так и в пространстве [1—4]. Большинство авторов свое внимание уделяют разогреву системы носителей и последующей передаче энергии ре-