

## ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$

*В. А. Кульбачинский, И. А. Чурилов, П. Д. Марьянчук, Р. А. Лунин*

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119899, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 2 апреля 1997 г.

Исследованы гальваномагнитные свойства монокристаллов полумагнитного полупроводника  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с  $0.01 < y < 0.1$  и  $x = 0.05, 0.14$  в интервале температур 4.2–300 К. Особенности зависимостей коэффициента Холла  $R_H$  от температуры и сложное поведение  $R_H$  в магнитном поле объясняются количественно существованием трех групп носителей тока — электронов и двух типов дырок, для которых получены температурные зависимости концентраций и подвижностей. Наблюдается переход от  $p$ -типа проводимости к  $n$ -типу с увеличением содержания Se, и одновременно отрицательное магнитосопротивление сменяется положительным.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полумагнитные полупроводники, или разбавленные магнитные полупроводники, представляют собой твердые растворы, в которых одна из компонент замещается на атом переходного элемента М с некомпенсированным магнитным моментом. Среди соединений  $A_{1-x}^{II}M_xB^{VI}$  ( $A^{II}$ ,  $B^{VI}$  — элементы II и VI групп соответственно, М — металл) полумагнитные полупроводники типа  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  относительно хорошо изучены [1–3]. Установлено, что  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  имеет проводимость  $p$ -типа [4], а  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  всегда имеет проводимость  $n$ -типа с высокой концентрацией электронов [5]. Тип проводимости связан с возникающими в кристаллах заряженными дефектами: в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  акцепторными дефектами являются вакансии в подрешетке ртути, в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  донорными являются атомы ртути в междоузлиях и вакансии в подрешетке селена. Представляло интерес исследовать полумагнитные полупроводники  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ . Можно предположить, что при изменении концентрации селена произойдет своеобразная компенсация различных дефектов, что даст возможность регулировать тип проводимости и концентрацию носителей тока в четверном соединении. Гальваномагнитные свойства  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  в зависимости от содержания Mn изучались ранее в работах [6–8], кроме этого исследовались переходы в состояние спинового стекла [7, 8].

В настоящей работе исследуются гальваномагнитные свойства (в интервале температур 4.2–300 К) монокристаллов твердых растворов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с  $x = 0.05$  и  $0.14$  при изменении концентрации селена от  $y = 0.01$  до  $y = 0.10$ .

## 2. ОБРАЗЦЫ

Монокристаллы  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  выращивались методом Бриджмена из химически чистых компонентов. Для измерений из слитков электроэрозионным методом вырезались образцы с характерными размерами  $0.6 \times 0.6 \times 5 \text{ мм}^3$ . Содержание марганца уточнялось с помощью рентгеновского микрозонда и по измерениям абсолютной величины магнитной восприимчивости при комнатной температуре, которые в пределах ошибки измерений дали одинаковые результаты. Содержание Se в образцах указано по этим данным. В результате рентгеновского микрозондового анализа и магнитных измерений установлено отсутствие в образцах включений других фаз и их гомогенность. Однородность образцов контролировалась также по измерениям коэффициента Холла  $R_H$  по длине образцов. (Разница значений  $R_H$  не превышала нескольких процентов, что свидетельствует о высокой однородности исследуемых образцов.)

Электрические измерения проводились на свежепротравленных образцах на постоянном токе четырехконтактным методом. Исследовались образцы  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  с  $x = 0.05, 0.14$  и  $y = 0.01; 0.05, 0.075; 0.10$ . Некоторые параметры исследованных монокристаллов при  $T = 4.2 \text{ К}$  приведены в табл. 1 и 2. В таблицах  $n, p_1, p_2$  — концентрации электронов и дырок соответственно,  $\mu_e, \mu_{p1}, \mu_{p2}$  — подвижности электронов и дырок,  $y$  — концентрация Se в образцах.

Известно, что на электрические и гальваномагнитные свойства полупроводниковых твердых растворов на основе теллурида ртути существенное влияние оказывает приповерхностная область [9]. С целью исключения этого эффекта образцы непосредственно перед измерением протравливались. Специальные исследования показали, что выдержка протравленных образцов на воздухе в течение нескольких дней не изменяет их электрофизические свойства, в частности сложное поведение коэффициента Холла в магнитном поле при разных температурах, т. е. приповерхностная область не влияет на полученные результаты.

Таблица 1  
 Параметры исследованных образцов  $Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{1-y}Se_y$  при 4.2 К

$N$	$y$	$n,$ $10^{14} \text{ см}^{-3}$	$\mu_e,$ $10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$p_1,$ $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p1},$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$p_2,$ $10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p2}$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1	0.01	0.3	-6.0	2.7	820	9.0	3000
2	0.05	0.003	-6.0	0.9	130	0.46	4800
3	0.075	2.5	-3.0	7.8	850	25.0	5300
4	0.10	1.1	-1.2	42.0	60	0.52	4100

Таблица 2  
 Параметры исследованных образцов  $Hg_{0.95}Mn_{0.05}Te_{1-y}Se_y$  при 4.2 К

$N$	$y$	$n,$ $10^{14} \text{ см}^{-3}$	$\mu_e,$ $10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$p_1,$ $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p1},$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$p_2,$ $10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p2}$ $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1	0.01	5.3	-1.5	2.8	715	7.2	2000
2	0.10	72.0	-0.56	8.2	80	4.8	5700

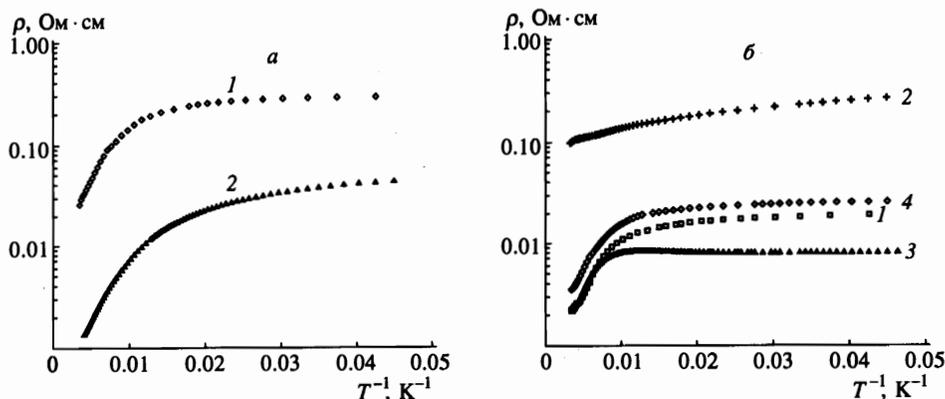


Рис. 1. Зависимости сопротивления от обратной температуры образцов  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$  с различным содержанием Mn и Se: а —  $x = 0.05$ , 1 —  $y = 0.01$ , 2 —  $y = 0.10$ ; б —  $x = 0.14$ , 1 —  $y = 0.01$ , 2 —  $y = 0.05$ , 3 —  $y = 0.075$ , 4 —  $y = 0.10$

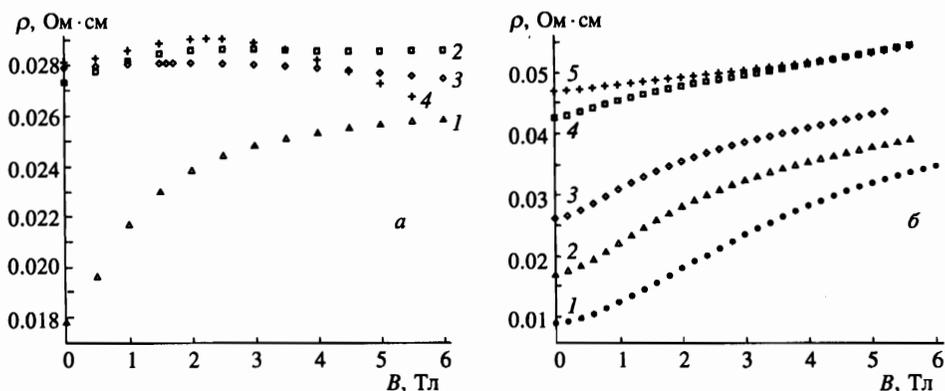


Рис. 2. Зависимость сопротивления от магнитного поля у образца  $Hg_{0.95}Mn_{0.05}Te_{1-y}Se_y$  с  $y = 0.01$  (а) и  $y = 0.10$  (б) при разных температурах  $T$ , К: а) 1 — 83, 2 — 40, 3 — 16, 4 — 4.2; б) 1 — 88, 2 — 61, 3 — 42, 4 — 21, 5 — 4.2

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При понижении температуры сопротивление всех образцов возрастает, демонстрируя активационное поведение с энергией активации около 30 мэВ при температурах выше  $\approx 100$  К (рис. 1). В образцах с минимальным содержанием селена при температурах ниже  $T = 30$  К проявляется отрицательное магнитосопротивление, тем большее, чем ниже температура. При увеличении содержания селена отрицательное магнитосопротивление уменьшается и при концентрации Se  $y = 0.10$  даже при температурах жидкого гелия магнитосопротивление становится положительным. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость сопротивления  $\rho(B)$  для образца  $Hg_{0.95}Mn_{0.05}Te_{1-y}Se_y$  с  $y = 0.01$  (рис. 2а) и  $y = 0.10$  (рис. 2б). На рис. 3 приведено относительное изменение сопротивления  $[\rho(B) - \rho(0)]/\rho(0)$  в магнитном поле  $B$  для пяти исследованных образцов. Отрицательное магнитосопротивление в больших магнитных полях можно объяснить

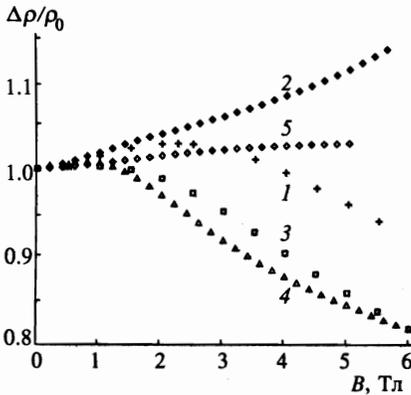


Рис. 3. Относительное магнитосопротивление при  $T = 4.2$  К у образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с различным составом: 1 —  $x = 0.05, y = 0.01$ ; 2 —  $x = 0.05, y = 0.1$ ; 3 —  $x = 0.14, y = 0.01$ ; 4 —  $x = 0.14, y = 0.075$ ; 5 —  $x = 0.14, y = 0.10$

увеличением проводимости по примесной зоне, характерной для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  [1–3], в связи с перекрытием волновых функций акцепторов в магнитном поле, т. е. так называемым магнитным вскипанием дырок [10–14]. С увеличением концентрации Se роль проводимости по акцепторной примесной зоне уменьшается, образцы даже изменяют тип проводимости от  $p$  к  $n$ , поэтому отрицательное магнитосопротивление сменяется положительным.

### 3.1. Определение подвижностей различных групп носителей тока по эффекту Холла

Наиболее сложно поведение коэффициента Холла  $R_H$  при разных температурах в зависимости от магнитного поля (рис. 4). У образца  $\text{Hg}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с прямой запрещенной зоной при 4.2 К коэффициент Холла положителен,  $R_H > 0$  (см. рис. 4а, б). При увеличении температуры знак  $R_H$  в слабых полях изменяется на отрицательный. Увеличение концентрации селена приводит к росту электронной концентрации и к смене знака коэффициента Холла в слабых магнитных полях. Этот эффект проявляется сильнее у бесщелевых образцов. В качестве примера на рис. 4в, г приведены зависимости  $R_H$  от магнитного поля при разных температурах для образцов  $\text{Hg}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с  $y = 0.01$  (е) и  $y = 0.10$  (з).

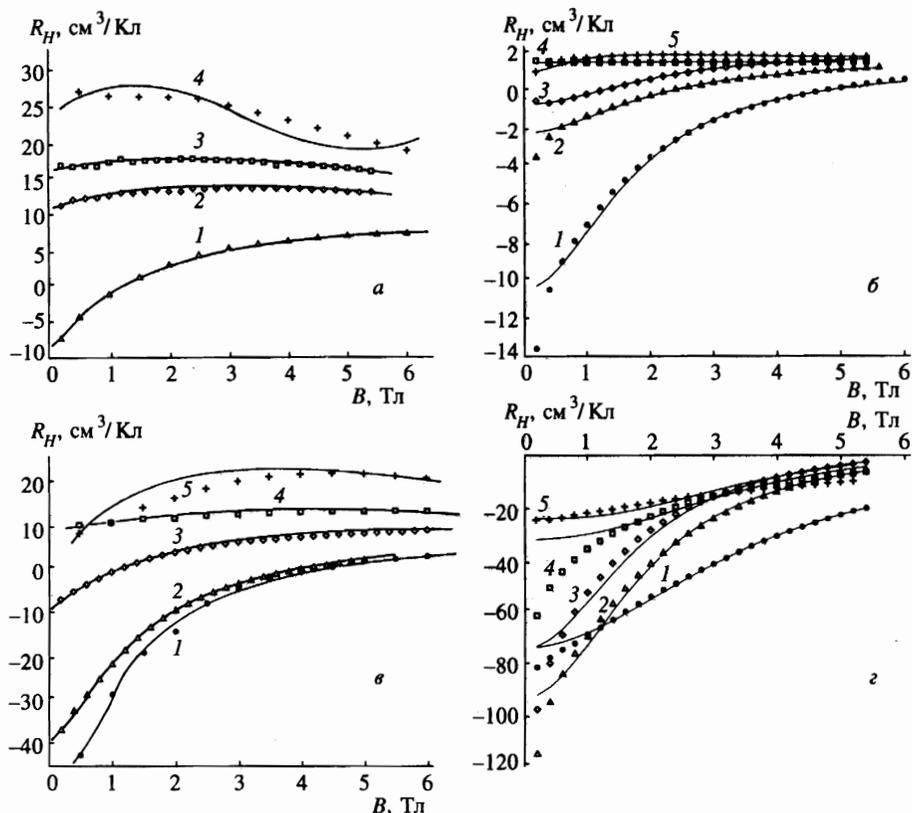
Количественно удалось удовлетворительно описать приведенные на рис. 4 зависимости  $R_H(B)$  лишь при учете трех типов носителей: зонных электронов и двух типов дырок с различными концентрациями и подвижностями, одни из которых являются собственными, а другие соответствуют примесной акцепторной зоне [7, 8]. Коэффициент Холла при этом зависит от магнитного поля (при холл-факторе для всех групп равном единице) следующим образом:

$$R_H(B) = N(A^2 + N^2 B^2)^{-1}, \tag{1}$$

где введены обозначения

$$N = \frac{en\mu_e^2}{1 + \mu_e^2 B^2} + \frac{ep_1\mu_{p1}^2}{1 + \mu_{p1}^2 B^2} + \frac{ep_2\mu_{p2}^2}{1 + \mu_{p2}^2 B^2}, \tag{2}$$

$$A = \frac{en\mu_e}{1 + \mu_e^2 B^2} + \frac{ep_1\mu_{p1}}{1 + \mu_{p1}^2 B^2} + \frac{ep_2\mu_{p2}}{1 + \mu_{p2}^2 B^2}. \tag{3}$$



**Рис. 4.** Зависимости коэффициента Холла от магнитного поля образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с  $x = 0.14$  и  $y = 0.01$  (а);  $x = 0.14$  и  $y = 0.10$  (б);  $x = 0.05$  и  $y = 0.01$  (в);  $x = 0.05$  и  $y = 0.10$  (г) при разных температурах  $T$ , К: а) 1—42, 2—17, 3—8.5, 4—4.2; б) 1—79, 2—53, 3—42, 4—21, 5—4.2; в) 1—81, 2—59, 3—36, 4—15, 5—4.2; г) 1—95, 2—61, 3—39, 4—20, 5—4.2. Точки — данные эксперимента, линии — расчет при трех типах носителей по формуле (1) (см. текст)

На рис. 4 линии соответствуют рассчитанным зависимостям  $R_H(B)$  при учете указанных трех групп носителей. В табл. 1 и 2 приведены концентрации и подвижности электронов и дырок при температуре 4.2 К, полученные из подгонки зависимостей  $R_H(B)$ . Подгонка экспериментальных зависимостей  $R_H(B)$  при разных температурах позволила определить подвижности и концентрации для трех групп носителей тока, которые приведены в табл. 1–3. Все подвижности с увеличением температуры уменьшаются. Наиболее высоки значения электронной подвижности, что характерно для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . При этом концентрация электронов возрастает с увеличением содержания селена в образцах вплоть до смены типа проводимости с  $p$  на  $n$  (образцы с  $x = 0.05$ ). Подвижности с понижением температуры во всех трех группах увеличиваются, в то время как концентрации носителей тока уменьшаются.

### 3.2. Определение подвижностей различных групп носителей тока из положительного магнитосопротивления

Для нахождения подвижностей различных групп носителей тока в исследуемых образцах нами также был использован классический эффект магнитосопротивления. В работе [15] предложен метод, который преобразует зависимости сопротивления от магнитного поля в так называемый спектр подвижности, который дает максимальную проводимость как функцию подвижности. В этом методе принимается, что концентрация носителей тока  $n$  является непрерывной функцией  $n(\mu)$  их подвижности  $\mu$ , так что поперечные элементы тензора проводимости могут быть записаны в виде интеграла, суммирующего вклады в проводимость от каждой группы носителей:

$$\sigma_{xx}(B) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\mu)d\mu}{1 + (\mu B)^2}, \quad \sigma_{xy}(B) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\mu)\mu B d\mu}{1 + (\mu B)^2}, \quad (4)$$

где  $s(\mu)d\mu = en(\mu)d\mu$  — вклад в проводимость при  $B = 0$  от носителей, имеющих подвижность от  $\mu$  до  $\mu + d\mu$ . В этих уравнениях принимается, что электроны имеют отрицательную подвижность, а дырки — положительную. В случае, когда имеются  $N$  типов носителей тока с дискретными концентрациями  $n_i$  и подвижностями  $\mu_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), в спектре подвижности появляется  $N$  пиков, центры которых находятся в  $\mu_i$ , а амплитуды равны  $en_i\mu_i$ . Метод спектра подвижности применим, если: 1) отсутствует квантование энергетического спектра в магнитном поле [16], т. е. магнитные поля слабые; 2) магнитное поле не изгибает существенно траекторию носителей тока в области взаимодействия их с рассеивающими центрами (вакансиями в подрешетке ртути, атомами ртути в междоузлиях, вакансиями в подрешетке селена и пр.).

Значения положительного магнитосопротивления в интервале от 0.2 Тл до 5 Тл для различных образцов были преобразованы в спектры подвижности. На рис. 5 приведен спектр подвижности для образца  $Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.90}Se_{0.10}$  при температуре 79 К. На этом рисунке видно, что существуют три группы носителей тока с разными подвижностями: две группы дырок и электроны. Полученные из спектров подвижности значения подвижностей хорошо совпадают с рассчитанными по магнитопольным зависимостям коэффициента Холла во всех образцах. Концентрации и подвижности электронов, определенные из максимумов в спектре подвижности, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Подвижности носителей тока у образцов  $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ , определенные по спектрам подвижности (колонка 1) и из измерений коэффициента Холла (колонка 2) при различных температурах

Образец	T, К	$\mu_e, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$		$\mu_{p1}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$		$\mu_{p2}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	
		1	2	1	2	1	2
$Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.90}Se_{0.10}$	79	-5700	-6500	70	60	2400	-
$Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.90}Se_{0.10}$	42	-6600	-5000	75	50	-	800
$Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.90}Se_{0.10}$	4.2	-10000	-12000	50	60	3100	4100
$Hg_{0.95}Mn_{0.05}Te_{0.90}Se_{0.10}$	4.2	-4500	-5700	60	80	3400	5700

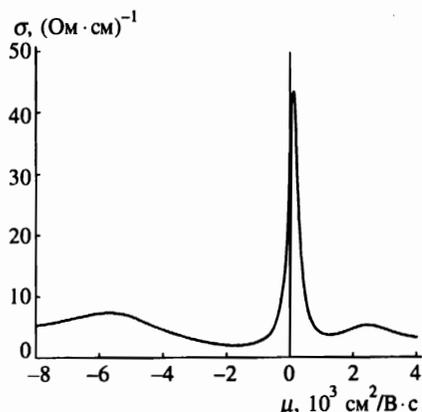


Рис. 5. Спектр подвижности при температуре 79 К образца  $\text{Hg}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}\text{Te}_{0.90}\text{Se}_{0.10}$  — три максимума соответствуют трем группам носителей тока (для электронов подвижность отрицательна)

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в полумагнитном полупроводнике  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  транспортные свойства, инверсия знака коэффициента Холла при увеличении температуры и его сложное поведение в магнитном поле определяются как электронами, так и двумя группами дырок. При увеличении содержания селена концентрация электронов возрастает и тип проводимости меняется от  $p$  к  $n$ . При 4.2 К у образцов  $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  с  $y < 0.1$  наблюдается отрицательное магнитосопротивление, связанное с изменением перекрытия волновых функций акцепторов в магнитном поле, при большем содержании Se переходящее в положительное. Для трех групп носителей тока — электронов и двух типов дырок — получены температурные зависимости подвижностей и концентраций в зависимости от содержания селена.

#### Литература

1. J. K. Furdyna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
2. N. V. Brandt and V. V. Moshchalkov, Adv. Phys. **33**, 194 (1984).
3. И. И. Ляпилин, И. М. Цидильковский, УФН **146**, 35 (1985).
4. Н. Б. Брандт, В. В. Мошchalkov, А. О. Орлов и др., ЖЭТФ **84**, 1059 (1983).
5. Ж. Т. Исмаилов, В. А. Кульбачинский, С. М. Чудинов и др., ФТП **22**, 375 (1988).
6. К. Р. Крылов, Н. К. Леринман, А. И. Пономарев и др., ФТП **28**, 1382 (1994).
7. В. А. Кульбачинский, П. Д. Марьянчук, И. А. Чурилов, ФТП **29**, 2007 (1995).
8. V. A. Kulbachinskii, P. D. Maryanchuk, I. A. Churilov et al., Semicond. Sci. Technol. **10**, 463 (1995).
9. V. I. Ivanov-Omskii, N. N. Berchenko, and A. I. Elizarov, Phys. Stat. Sol. (a) **103**, 11 (1987).
10. J. Mycielski, in *Recent Development in Condensed Matter Physics*, ed. by J. T. DeVreese (Plenum, New York, 1981), Vol. 1, p. 725.
11. L. R. Gawron and J. Trylski, in *Lecture Notes in Physics 152. Physics of Narrow Gap Semiconductors. Proc. of the Lintz Conf., 1981*, ed. by E. Gornik, H. Heinrich, and L. Palmetshofer, Springer, Berlin (1982), p. 294.
12. A. Mycielski and J. Mycielski, J. Phys. Soc. Jap. Suppl. A **49**, 807 (1980).
13. W. B. Johnson, J. R. Anderson, and D. R. Stone, Phys. Rev. B **29**, 6679 (1984).
14. A. V. Davydov, B. B. Ponikarov, and I. M. Tsidilkovskii, Phys. Stat. Sol. (b) **101**, 127 (1980).
15. W. A. Beck and J. R. Anderson, J. Appl. Phys. **62**, 541 (1987).
16. I. A. Panaev, S. A. Studenikin, D. I. Lubyshev, and V. P. Migal, Semicond. Sci. Technol. **8**, 1822 (1993).