

концентрации носителей заряда при облучении определяется в основном введением A - и E -центров.

Из рис. 2 видно, что зависимость ЭВД от T^{-1} является экспоненциальной.¹ Параметры ΔE_0 различны для двух используемых типов образцов. Для образцов 1 имеем $\Delta E_0=20$, для образцов 2 — $\Delta E_0=30$ мэВ. При этом выполняется примерное равенство отношений

$$\Delta E_0(1)/\Delta E_0(2) \simeq a(n_{01})/a(n_{02}), \quad (10)$$

что и следует из (8).

Таким образом, предложенный в [3-5] подход к описанию зависимости ЭВД от интенсивности облучения может быть применен к описанию зависимости ЭВД от температуры.

Интересно отметить, что предложенный подход к описанию температурной зависимости ЭВД позволяет по-иному трактовать результаты экспериментов по зависимости пороговой энергии образования дефектов от температуры [9, 10]. Согласно (7), при приближении T к T_m эффективность введения вторичных радиационных дефектов стремится к нулю. В то же время T_m определяется условиями проведения эксперимента (8): концентрацией носителей заряда n_0 (т. е. степенью легирования кристалла), интенсивностью облучения, временем жизни неравновесных носителей заряда и энергией дефектообразующих электронов E_c . При прочих равных условиях уменьшение E_c приведет к увеличению T_m , что в эксперименте может быть воспринято как изменение пороговой энергии с температурой.

Список литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [2] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
- [3] Войцеховский А. И., Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Шаховцов В. И. // Письма ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 12. С. 1029—1032.
- [4] Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Осташко Н. И., Шаховцов В. И. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 12. С. 2202—2204.
- [5] Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Осташко Н. И., Шаховцов В. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 2. С. 215—218.
- [6] Wertheim G. K. // Phys. Rev. 1959. V. 115. N 3. P. 568—569.
- [7] Stein H. J., Vook F. L. // Phys. Rev. 1967. V. 163. N 3. P. 790—800.
- [8] Вавилов В. С., Глазман В. Б., Исаев Н. У., Мукашев Б. Н., Спицын А. В. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 3. С. 471—475.
- [9] Панов В. И., Смирнов Л. С. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 1. С. 212—215.
- [10] Федина Л. И., Асеев А. Л., Денисенко С. Г., Смирнов Л. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 592—597.

Институт физики АН УССР
Киев

Получено 5.02.1990
Принято к печати 11.04.1990

ФТП, том 24, вып. 8, 1990

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА И РЕКОМБИНАЦИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $Mn_xHg_{1-x}Te$ ($x \sim 0.1$)

Баранский П. И., Беляев А. Е., Боднарук О. А.,
Горбатюк И. Н., Комирченко С. М., Раренко И. М., Шевченко Н. В.

В настоящее время $Cd_xHg_{1-x}Te$ является одним из основных материалов, используемых для ИК детекторов. Однако, несмотря на достигнутые успехи в получении как качественного материала, так и приборов на его основе, су-

¹ В области температур, меньших 100 К, наблюдается отклонение ЭВД от экспоненциальной зависимости, которое усиливается при дальнейшем понижении температуры. Результаты этих исследований будут опубликованы в ближайшее время.

существуют определенные трудности, связанные в основном с нестабильностью системы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Имеются теоретические соображения, указывающие на то, что устойчивость и эффективность $\text{Hg}-\text{Te}$ -связи, заметно ослабляющейся при наличии $\text{Cd}-\text{Te}$ в твердом растворе, могут быть существенно повышены в сплаве с $\text{Mn}-\text{Te}$ [1]. В связи с этим представляет интерес исследование электрофизических и рекомбинационных параметров в соединениях $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, поскольку детальное изучение указанных характеристик позволяет производить оценки возможности создания соответствующих приборов на основе исследуемых материалов и их предельных параметров. Одним из первых шагов в этом направлении является, на наш взгляд, изучение влияния различных режимов термообработок выращенных кристаллов на явления переноса и рекомбинацию в них.

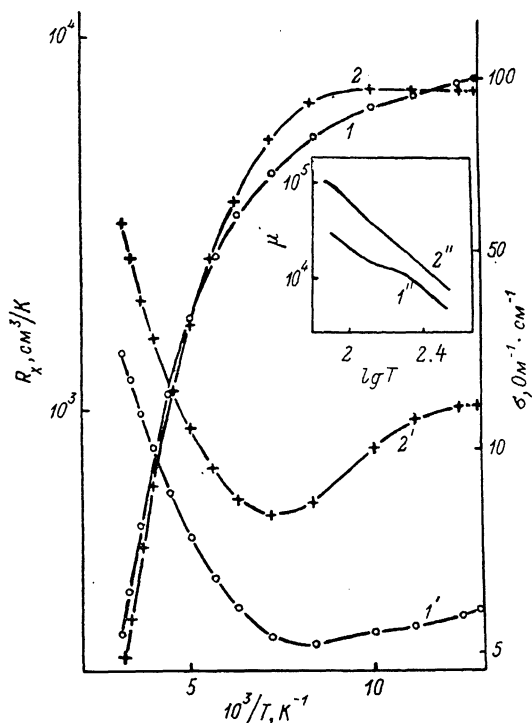


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла R_x (1, 2), удельной проводимости σ ($1'$, $2'$) и подвижности μ ($1''$, $2''$).

Образцы групп: 1, $1'$, $1''$ — I, 2, $2'$, $2''$ — II.

В данном сообщении приводятся результаты по определению времени жизни неравновесных носителей заряда в объемных кристаллах $\text{Mn}_{0.1}\text{Hg}_{0.9}\text{Te}$, позволившие провести идентификацию основных рекомбинационных механизмов в температурном интервале 77—250 К. На этих же образцах были выполнены измерения удельной проводимости σ и коэффициента Холла R_x , использованные для расчета подвижности μ и концентрации равновесных носителей заряда n .

Специально не легированные кристаллы $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ были выращены модифицированным методом зонной плавки и отожжены в парах Hg при различных температурных и временных режимах с целью конверсии типа проводимости (из p -типа в n -тип). Холловские измерения ($B=0.3$ Т) и измерения удельной проводимости проводились в интервале температур 77—300 К. Время жизни неравновесных носителей заряда определялось по кинетике фототока при низком уровне объемного возбуждения. Спад фотосигнала был экспоненциальным при $77 \leq T \leq 250$ К.

Исследуемые образцы были разделены на две группы в соответствии с режимами термоотжига: 1) режим I — двухзонный отжиг в парах Hg ; 2) ре-

Образец в режиме	α	$E_{g\text{т}}, \text{эВ}$	$n_{\text{т}}, \text{см}^{-3}$	$\mu_{\text{т}}, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$E_f, \text{эВ}$	$N_f, \text{см}^{-3}$
I	0.102	0.148	$7.8 \cdot 10^{14}$	$2.95 \cdot 10^4$	0.067	$1.67 \cdot 10^{15}$
II	0.097	0.129	$8.5 \cdot 10^{14}$	$9.74 \cdot 10^4$	0.065	$4.4 \cdot 10^{14}$

жим II — изотермический отжиг в парах ртути при различном остаточном давлении кислорода.

На рис. 1 представлены температурные зависимости коэффициента Холла R_H , удельной проводимости σ и подвижности μ для двух образцов, отожженных соответственно в режимах I и II. Обращает на себя внимание наличие экспоненциального участка в области $T < 125 \text{ К}$ на зависимости $R_H(T)$ в образце группы I. В образцах группы II при этих же температурах R_H выходит на насыщение. Кроме того, на зависимости $\mu(T)$ для образца группы I при $T \approx 150 \text{ К}$ наблюдается перегиб (см. вставку на рис. 1), отсутствующий на этой же зависимости для образца группы II.

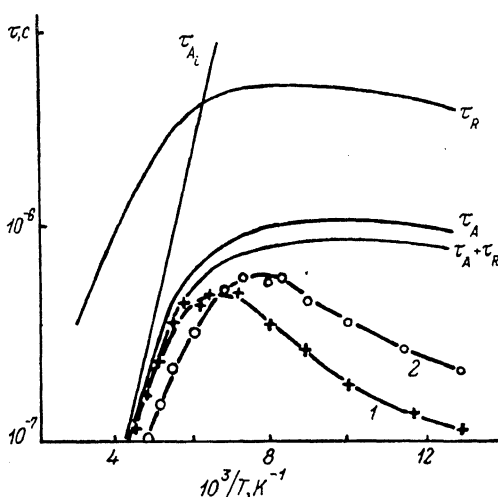


Рис. 2. Температурные зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда τ . Сплошные линии — расчет, точки — эксперимент для образцов I (1) и II групп (2).

Как уже отмечалось, неотожженные кристаллы $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ имеют p -тип проводимости. Дальнейший термоотжиг приводит к конверсии типа проводимости, однако при этом в матрице n -типа возможно наличие областей p -типа. Характерное проявление таких областей наблюдалось в [2] в виде аномалий на температурных и магнитопольных зависимостях R_H , ρ и μ при $T < 30 \text{ К}$. В исследованных нами образцах подобные аномалии не наблюдались. Более того, результаты температурных ($T < 30 \text{ К}$) и магнитопольных зависимостей удельного сопротивления и коэффициента Холла [3] позволяют сделать вывод о том, что в исследуемых образцах вкладом включений p -типа можно пренебречь.

Появление экспоненциального участка на зависимости $R_H(T)$ в области $T < 125 \text{ К}$ на образце группы I логично, на наш взгляд, связать с наличием в этих образцах достаточно глубоких донорных центров ($E_D \approx 6 \text{ мэВ}$) и их деионизацией при понижении температуры. Наблюдаемый перегиб на $\mu(T)$ также можно объяснить деионизацией доноров. Действительно, при понижении температуры увеличивается вклад примесного рассеяния, который приводит к появлению максимума на зависимости $\mu(T)$ и дальнейшему спаду или выходу на насыщение (в зависимости от степени вырождения). Однако начиная с некоторой температуры ($T \leq 150 \text{ К}$) происходит вымораживание свободных носителей на более глубокий донор, т. е. уменьшается концентрация заряженных

примесей, что должно приводить к росту подвижности. Численный расчет, выполненный для данного случая, подтверждает это предположение.

Удовлетворительное объяснение зависимости $\tau(T)$ может быть получено, если учесть межзонную Оже (τ_A) и излучательную (τ_R) рекомбинации, а также рекомбинацию через локальные центры (τ_{SR}) в модели Шокли—Рида. Основные принципы вычислений вкладов отмеченных рекомбинационных механизмов приведены в [4–6]. В данной работе был использован подход, предложенный в [6]. При этом мы полагали, что сечение захвата $S_n = S_p \approx 10^{-16} \text{ см}^2$, E_i — энергия центров Шокли—Рида, N_i — их концентрация были подгочными параметрами при вычислении τ_{SR} (эффектами прилипания мы пренебрегали). Используемый диапазон температур позволяет для удовлетворительного совмещения расчетных кривых с экспериментальными данными выбрать E_i и N_i с точностью не хуже 7%. При расчетах мы использовали также следующие параметры: $P = 7.7 \times 10^{-8} \text{ эВ см}$ [8], $\Delta = 1 \text{ эВ}$ [8], $\epsilon_\infty = 15.2 - 65.9x + 70.4x^2$ [9].

Результаты холловских измерений позволили получить выражение для определения собственной концентрации n_i , которое удовлетворительно описывает эксперимент для $0.080 \leq x \leq 0.102$: $n_i(x, T) = (-8.44 + 120x + 0.01T) \times 10^{14} E_g^{3/4} T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$, см^{-3} .

Зависимость ширины запрещенной зоны от состава ($0.08 \leq x \leq 0.21$) и температуры определялась из выражения, полученного на основании данных работы [10]: $E_g(x, T) = -0.302 + 5.35 \cdot 10^{-4} (1 - 4.9x)T + 4.44x - 2.209x^2 + 0.055x^3$, эВ.

Измеренные нами параметры представлены в таблице.

На рис. 2 приведены экспериментальные и теоретически рассчитанные зависимости $\tau = \tau(10^3/T)$. Эти результаты показывают, что в высокотемпературной области существен вклад лишь оже-процессов, в то время как при $T < 130 \text{ К}$ основным механизмом, ограничивающим τ , становится рекомбинация через локальные центры, концентрация которых, как видно из таблицы, в значительной мере зависит от режима термообработки. Положение уровня практически совпадает во всех исследованных образцах и характеризуется значением $E_r + (0.070 \pm 0.010)$ эВ. Обращает на себя внимание тот факт, что такие уровни обнаруживались в образцах $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ [5, 6].

Таким образом, в образцах $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0.1$) в зависимости от режима термообработки обнаруживается наличие глубоких донорных состояний с энергией $\sim 6 \text{ мэВ}$. Время жизни неравновесных носителей заряда при низких температурах существенно ограничивается присутствием рекомбинационных центров, расположенных на $\sim 70 \text{ мэВ}$ выше валентной зоны, концентрация которых также во многом зависит от используемых режимов термообработки.

Список литературы

- [1] Wall A., Caprille Franciosi A., Reifenberder R., Debska U. // J. Vac. Sci. Techn. 1986. V. A314. P. 818–822.
- [2] Глузман Н. Г., Леринман Н. К., Сабирзянова Л. Д., Боднарук О. А., Горбатюк И. Н., Раренко И. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1032–1037.
- [3] Беляев А. Е., Городничий О. П., Семенов Ю. Г., Шевченко Н. В., Боднарук О. А., Раренко И. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 2. С. 335–338.
- [4] Kinch M. A., Brau M. J., Simmons A. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 4. P. 1649–1663.
- [5] Баженов Н. Л., Гельмонт Б. Л., Иванов-Омский В. И., Малькова Л. А., Огородников В. К., Тотиева Т. Ц. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 109–112.
- [6] Pratt R. G., Hewett J., Capper P., Jones C. L., Judd N. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 7. P. 2377–2385.
- [7] Dobaczewski A., Janik E., Karczewski J. // Fourth Int. Conf. II—VI Comp. Berlin (West), 1989. Abstracts. Мо-p-54.
- [8] Bastard G., Rigaux G., Guldner Y., Mysielski A., Furdyna J. K., Mullin D. P. // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. N 4. P. 1961–1970.
- [9] Баранский П. И., Городничий О. П., Шевченко Н. В., Боднарук О. А. // Деп. в ЦНИИ «Электроника». М., 1988. № P-4764.
- [10] Боднарук О. А., Городничий О. П., Шевченко Н. В. // Матер. VII Всес. симп. «Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы». Львов, 1986. Ч. I. С. 37–39.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получено 6.12.1989

Принято к печати 13.04.1990

¹ Недавно в работе [7] на основании данных, полученных методом НЕСГУ на $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, определены $S_n \approx S_p \approx 10^{-17} \text{ см}^2$. Использование этих значений приводит в нашем случае к уменьшению N_i на порядок.