

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ МАРГАНЕЦ—РУТУТЬ—ТЕЛЛУР *n*-ТИПА

Трифорова М. М., Барышев Н. С., Мезенцева М. П.

Проведены измерения коэффициента Холла и электропроводности слоев n - $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0.095 \div 0.15$ и концентрациями нескомпенсированных доноров не более $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии и подвергнутых длительному отжигу в парах ртути, в интервале температур $4.2 \div 300 \text{ К}$. Установлено, что наряду с мелкими донорами и акцепторами в них содержатся акцепторные центры с глубоким уровнем, концентрация которых в отдельных слоях может достигать $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Путем сравнения экспериментальных данных с расчетами показано также, что в области высоких температур электроны рассеиваются в основном на полярных оптических фононах, при промежуточных температурах — на фононах и нейтральных глубоких акцепторах, а при низких температурах — на заряженных донорах и акцепторах; суммарные концентрации доноров и акцепторов в исследованных слоях составляют $5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Монокристаллические слои $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (МРТ) выращивались методом жидкофазной эпитаксии из теллуридов растворов-расплавов на подложках из сапфира или теллурида кадмия и имели толщину от 30 мкм до 1.5 мм; в последующем они изучались либо на подложках, либо отделялись от них. Выращенные слои имели проводимость p -типа, концентрацию носителей заряда порядка 10^{17} см^{-3} и подвижности $(2 \div 5) \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре 77 К. Снижение концентрации дырок и получение образцов с электронной проводимостью достигалось длительным отжигом слоев в парах ртути. В настоящих исследованиях были использованы слои n -типа с $x=0.095 \div 0.15$ и концентрациями нескомпенсированных доноров не более $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Состав их определялся по длинноволновому краю фоточувствительности, измеренной при температуре жидкого азота, и зависимости ширины запрещенной зоны E_g МРТ от x при этой температуре [1]. Измерения коэффициента Холла и электропроводности проводились шестизондовым методом при комнатной температуре и температуре жидкого азота; на ряде образцов измерения R_H и σ были выполнены в интервале температур от комнатной до температуры жидкого гелия.

В большинстве исследованных слоев МРТ n -типа коэффициент Холла был практически постоянным в области примесной проводимости вплоть до температуры жидкого гелия. Однако в некоторых образцах наблюдалось возрастание величины $|R_H|$ при низких температурах, свидетельствующее о наличии локальных уровней в запрещенной зоне материала. Температурные зависимости коэффициента Холла для двух таких образцов с составами $x=0.105$ и $x=0.095$ приведены на рис. 1. Эти зависимости анализировались на основе уравнения электрической нейтральности. При вычислении собственной концентрации носителей заряда эффективная масса тяжелых дырок полагалась равной $0.447 m_0$ (m_0 — масса свободного электрона), как и в твердых растворах КРТ [2], эффективная плотность состояний в зоне проводимости определялась по кейновской модели, а зависимость ширины запрещенной зоны от состава и температуры была заимствована из работы [1].

Анализ низкотемпературной части ($T < 100 \text{ К}$) кривой $R_H(T)$ для образца 1 показал, что наблюдаемое уменьшение концентрации электронов в этой области

невозможно объяснить наличием одного донорного уровня в запрещенной зоне (наряду, конечно, с очень мелкими донорами N_d и акцепторами N_{a1}). Поскольку наличие нескольких близколежащих донорных уровней с различными энергиями ионизации маловероятно, экспериментальные данные по $R_H(T)$ были объяснены в предположении, что в слоях наряду с очень мелкими донорами и акцепторами содержатся акцепторные центры с уровнем энергии, расположенным примерно на 5 мэВ ниже дна зоны проводимости. Из экспериментальных значений $|R_H|$ при гелиевых и промежуточных температурах, где коэффициент

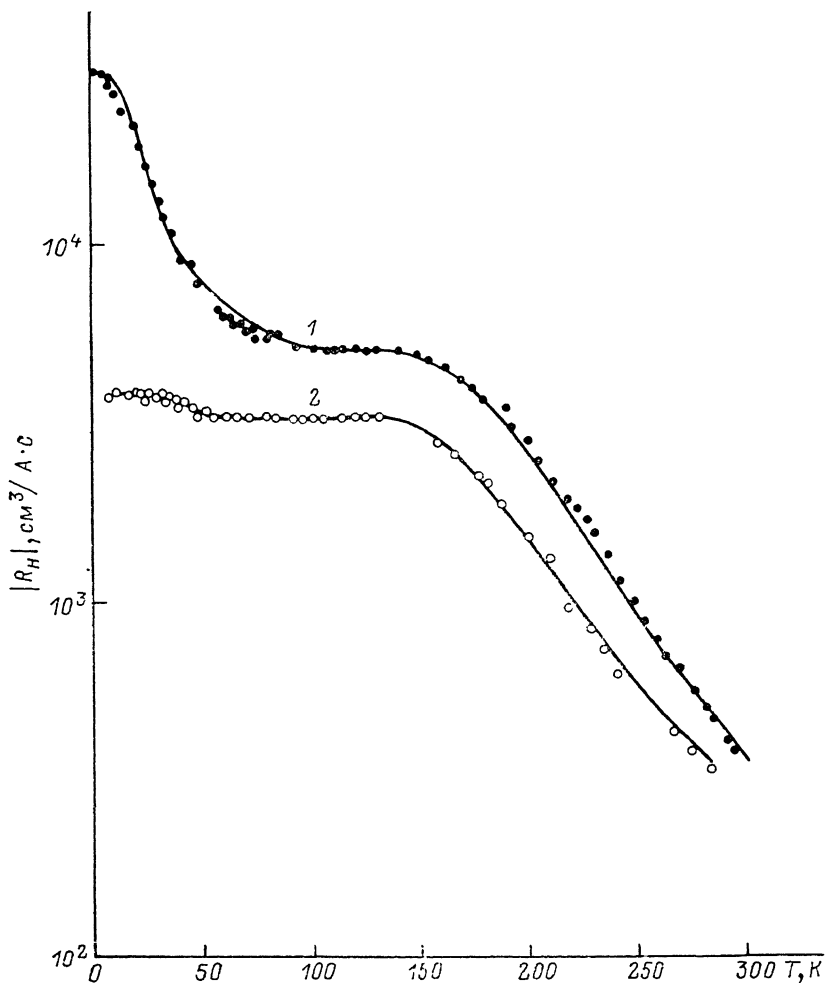


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла для эпитаксиальных слоев $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n -типа с $x=0.105$ (1) и $x=0.095$ (2). Точки и кружки — эксперимент, кривые — расчет.

Холла постоянен, следует, что концентрации глубоких акцепторов N_{a2} равны $1 \cdot 10^{15}$ и $2.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в образцах 1 и 2 соответственно. Кривые на рис. 1 представляют результаты решения уравнений электрической нейтральности для этих двух образцов.

Температурные зависимости подвижности электронов для данных двух слоев представлены на рис. 2. С понижением температуры от комнатной μ_n возрастает, достигает максимальных значений при температурах 15 и 40 К в образцах 1 и 2, а затем уменьшается при дальнейшем снижении температуры. По аналогии с узкозонными твердыми растворами кадмий—ртуть—теллур [3] считаем, что в области высоких температур основным механизмом рассеяния электронов является рассеяние на полярных оптических фононах. Частоты оптических

фононов, значения диэлектрических постоянных и другие параметры для твердого раствора МРТ состава $x=0.12$ приведены в работе [4]. Заметим, что фононные частоты в этом материале не очень сильно отличаются от соответствующих частот в $\text{Cd}_{0.26}\text{Hg}_{0.74}\text{Te}$, который имеет такую же ширину запрещенной зоны при комнатной температуре. При высоких температурах необходимо также учитывать рассеяние электронов на тяжелых дырках, концентрация которых весьма высока и которые можно рассматривать как неподвижные ионы по отношению к электронам вследствие большого отношения их эффективных масс.

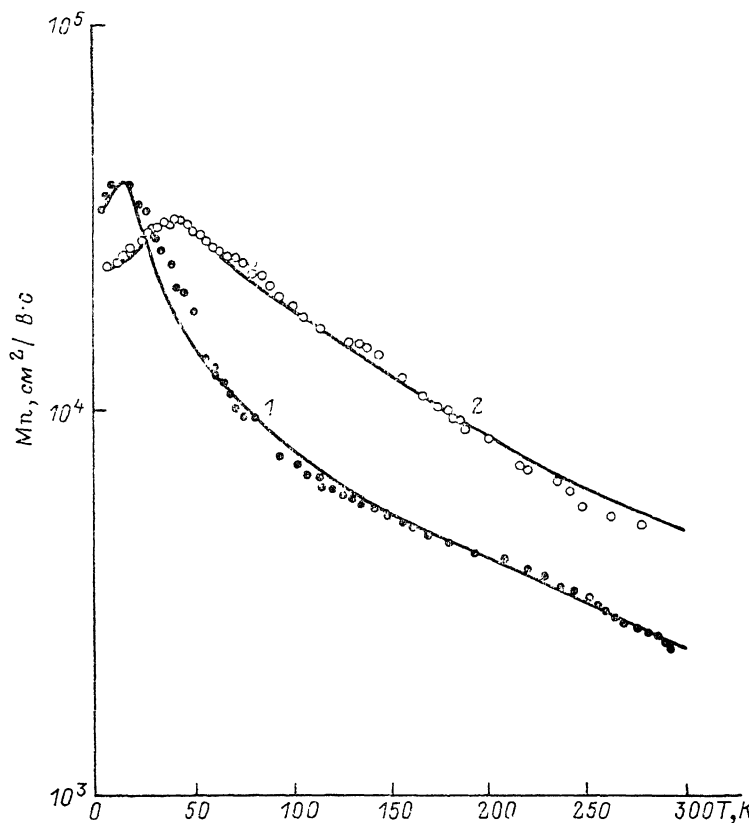


Рис. 2. Температурные зависимости подвижности электронов для эпитаксиальных слоев $n\text{-Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0.105$ (1) и $x=0.095$ (2). Точки и кружки — эксперимент, кривые — расчет.

Проведенные расчеты для МРТ с $x=0.095 \div 0.105$ показали, что комбинированную подвижность, обусловленную рассеянием электронов на полярных оптических фононах и тяжелых дырках в высокотемпературной области, можно представить в виде

$$\mu_L = (9 \div 7) \cdot 10^7 T^{-(1.65+1.7)} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Поскольку заселенность уровня глубоких акцепторных центров зависит от температуры, часть их, равная $N_{a2}f_{a2}$, находится в заряженном состоянии, а другая часть, равная $N_{a2}(1-f_{a2})$, — в нейтральном состоянии, где f_{a2} — функция распределения для этих центров. Поэтому при анализе экспериментальных значений подвижности электронов в широком интервале температур (4.2 ÷ 300 К) принималось во внимание их рассеяние на полярных оптических фононах, тяжелых дырках, нейтральных центрах и заряженных центрах, концентрация которых в данном случае равна $N_a + N_{a1} + N_{a2}f_{a2}$. Подвижность μ_N , обусловленная рассеянием на нейтральных центрах, вычислялась по формуле Эргинсоа, подвижность μ_L , связанная с рассеянием на заряженных центрах (а также тяжелых дырках), — по формуле Брукса—Херринга, причем в области гелие-

№ образца	Состав, <i>x</i>	<i>n</i> (77 К), см ⁻³	μ_n (77 К), см ² /В · с	<i>N_d</i> , см ⁻³	<i>N_{a1}</i> , см ⁻³	<i>N_{a2}</i> , см ⁻³	<i>N</i> , см ⁻³
1	0.105	1.1 · 10 ¹⁵	9.7 · 10 ³	2.5 · 10 ¹⁵	1.3 · 10 ¹⁵	1.0 · 10 ¹⁵	4.8 · 10 ¹⁵
2	0.095	1.86 · 10 ¹⁵	2.4 · 10 ⁴	6.8 · 10 ¹⁵	4.95 · 10 ¹⁵	2.4 · 10 ¹⁴	1.2 · 10 ¹⁶
3	0.11	5.5 · 10 ¹⁴	1.3 · 10 ⁴	1.03 · 10 ¹⁶	9.7 · 10 ¹⁵	—	2.0 · 10 ¹⁶
4	0.15	2.3 · 10 ¹³	1.0 · 10 ⁴	2.56 · 10 ¹⁵	2.54 · 10 ¹⁵	—	5.1 · 10 ¹⁵

вых температур учитывалось частичное вырождение электронного газа. Кривые на рис. 2 представляют результирующие расчетные подвижности электронов

$$\mu_n = (\mu_L^{-1} + \mu_N^{-1} + \mu_I^{-1})^{-1}$$

для образцов 1 и 2, которые удовлетворительно объясняют наблюдаемые зависимости $\mu_n(T)$. Концентрации рассеивающих центров и электрические параметры слоев при температуре жидкого азота приведены в таблице. В этой же таблице представлены параметры двух других слоев МРТ *n*-типа с составами $x=0.11$ (3) и $x=0.15$ (4), в которых не было обнаружено наличия глубоких акцепторных центров (т. е. их концентрация была значительно меньше $N_d - N_{a1}$). В последнем столбце таблицы указаны суммарные концентрации доноров и акцепторов $N = N_d + N_{a1} + N_{a2}$, которые в исследованных слоях находятся в интервале $5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Таким образом, установлено, что в области высоких температур электроны рассеиваются в основном на полярных оптических фононах, при промежуточных температурах — на полярных оптических фононах и глубоких нейтральных акцепторах, а при низких температурах — на заряженных донорах и акцепторах. Суммарные концентрации донорных и акцепторных центров в исследованных слоях равны $5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Список литературы

- [1] Kaniewski J., Mysielski A. // Sol. St. Commun. 1982. V. 41. N 12. P. 959—962.
- [2] Несмелова И. М., Тулвинская З. К., Барышев Н. С. // ЖПС. 1989. Т. 50. В. 3. С. 480—483.
- [3] Dubowski J. J., Dietl T., Szymanska W., Galazka R. R. // J. Phys. Chem. Sol. 1981. V. 42. N 5. P. 351—362.
- [4] Баранский П. И., Городничий О. П., Шевченко Н. В., Боднарук О. В. // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы. 1988. № 3 (232). С. 80.

Получена 11.12.1990
Принята к печати 13.02.1991