

## ПОЛУМАГНИТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Se}$ И $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Te}$

Марьянчук П.Д., Мазур Л.М., Майструк Э.В.  
Черновицкий национальный университет имени Юрия Федыковича,  
58012, Украина, Черновцы, ул. М. Коцюбинского, 2

Большой интерес вызывает новая группа полумагнитных полупроводников, в которых магнитным ионом является не марганец, а железо, -  $A_{1-x}^{\text{II}}\text{Fe}_x\text{B}^{\text{VI}}$ .

Растворимость железа в  $\text{HgSe}$  достигает  $\approx 20\%$ . Разные экспериментальные исследования продемонстрировали, что большинство физических свойств безцелевых полупроводников (БП)  $\text{HgFeSe}$  определяется положением уровня  $\text{Fe}^{2+}$  ( $3d^6$ ) относительно дна зоны проводимости. В соответствии с правилом Хунда уровень  $\text{Fe}^{2+}$  расположен выше по энергии, чем уровень  $\text{Mn}^{2+}$  ( $3d^5$ ), который находится глубоко в валентной зоне. Большинство экспериментальных данных указывают на то, что ионы  $\text{Fe}^{2+}$  размещаются в узлах регулярной решетки  $\text{HgSe}$  (примеси замещения) и являются нейтральными донорами, уровни которых размещены в зоне проводимости на расстоянии  $\approx 230$  мэВ от ее дна.

Положение уровня железа можно изменять, замещая часть ионов Se ионами Te ( $\text{HgSe}_{1-y}\text{Te}_y\text{:Fe}$ ). Такое смещение  $E_{\text{Fe}}$  связано с тем, что в кристаллах  $\text{HgTe:Fe}$  уровень железа находится не в зоне проводимости. Чем больше Te в образце, тем ниже резонансный уровень Fe [1].

Учитывая вышеприведенные результаты исследований, интересно было проследить, как будет себя вести уровень Fe в твердых растворах  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Se}$ , то есть при наличии еще одной магнитной компоненты – атомов марганца (Mn).

Исследование спектров пропускания (поглощения) кристаллов полумагнитных полупроводниковых твердых растворов  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Se}$  ( $0 < x \leq 0,1$ ;  $y \leq 0,01$ ), полученных методом Бриджмена, проводили на спектрометре ИКС – 21 при  $T \approx 300\text{K}$ . Кристаллы владеют  $n$ -типом проводимости и концентрацией электронов  $n \sim 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

На основе зависимостей  $\alpha = f(\lambda)$  получена зависимость  $\lg \alpha = f(\lg \lambda)$ .

По тангенсу угла наклона длинноволнового участка зависимости  $\lg \alpha = f(\lg \lambda)$ , обусловленного поглощением электромагнитных волн свободными носителями заряда, определили показатель степени ( $r$ ), который характеризует преобладающие механизмы рассеяния (поскольку  $\lg \alpha \sim r \cdot \lg \lambda$ , то  $r \sim \lg \alpha / \lg \lambda$ ).

Значения параметра  $r$  для разных составов исследованных твердых растворов приведены в таблице 1. Из таблицы следует, что параметр ( $r$ ) находится в пределах ( $2,1 \leq r \leq 2,5$ ), что соответствует доминированию комбинированного рассеивания электронов на акустических и полярных оптических фононах (на последних при  $T > \theta_{\text{д}}$ , ( $\theta_{\text{д}} \sim 225 \text{ K}$ )).

Температурные зависимости подвижности электронов в кристаллах  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Se}$  и проведенные теоретические оценки также указывают на то, что в области температур  $T \sim 80 \text{ K}$  наиболее вероятным является доминирование рассеивания электронов на пьезоакустических фононах, а при  $T \sim 300 \text{ K}$  – на полярных оптических фононах.

Таблица 1. Параметры образцов  $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Se}$

$x$	$y$	$Eg^{\text{оп}}$ , eВ	$r$
0,09	0,01	0,33	2,1
0,095	0,005	0,32	2,5
0,099	0,001	0,31	2,2

Наличие прямолинейного участка на зависимостях  $\alpha^2 = f(\hbar\omega)$  указывает на то, что в исследованных кристаллах имеют место прямые разрешенные межзонные оптические

переходы. Экстраполяцией линейных участков зависимостей  $\alpha^2 = f(\hbar\omega)$  к  $\alpha^2 = 0$  получили значения величины оптической запрещенной зоны ( $Eg^{оп}$ ) для разных составов твердых растворов при  $T \sim 300$  К (см. таблицу 1).

Магнитная восприимчивость исследованных образцов имеет вид характерный для парамагнетиков, то есть растет с понижением температуры вследствие уменьшения разориентирующего действия тепловых колебаний атомов кристаллической решетки на магнитные моменты атомов Mn и Fe. Зависимость  $\chi^{-1}_{Mn, Fe} = f(T)$  состоит из двух прямолинейных участков разного наклона (аналогично  $Hg_{1-x}Mn_xSe$ ), причем парамагнитные температуры  $\theta$  (полученные экстраполяцией этих участков к  $\chi^{-1}_{Mn, Fe} = 0$ ) отрицательные, что указывает на преобладание обменного взаимодействия антиферромагнитного характера. Это объясняется тем, что содержание марганца в кристаллах намного больше, чем содержание Fe ( $0,09 \leq x \leq 0,099$ ;  $0,001 \leq y \leq 0,01$ ). Полевая зависимость магнитной восприимчивости подтверждает наличие атомов железа в кристаллах.

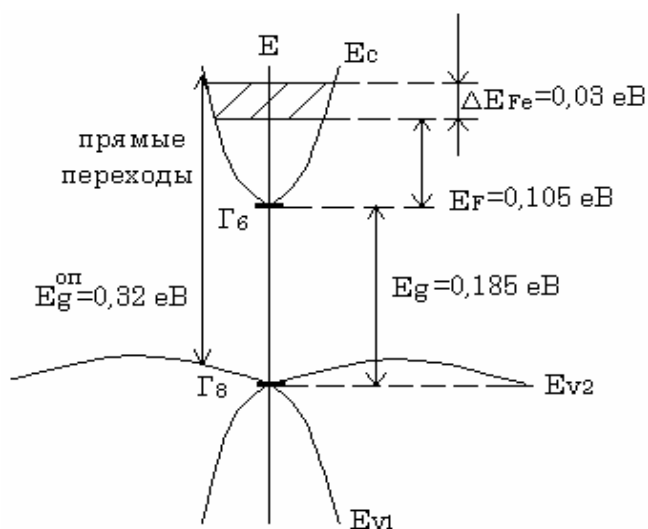
Электропроводность ( $\sigma$ ) исследованных образцов имеет металлический характер, то есть уменьшается с ростом температуры вследствие рассеивания электронов на фононах. Коэффициент Холла ( $R_H$ ) от температуры почти не зависит, что указывает на вырождение электронного газа. Увеличение термоэдс ( $\alpha$ ) с ростом температуры обусловлено частичным снятием вырождения электронного газа при росте  $T$ .

Из оптических исследований установлено, что замещение части атомов марганца атомами железа в кристаллах  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  (при  $x + y = 0,1$ ) приводит к увеличению  $Eg^{оп}$  (таблица 1) по сравнению с  $Eg^{оп} = 0,28$  эВ для  $Hg_{1-x}Mn_xSe$  ( $x = 0,1$ )  $n \sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Это может быть обусловлено или большей концентрацией электронов в  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  или тем, что в кристаллах  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  уровень Fe (около которого фиксируется уровень Ферми) находится выше в зоне проводимости. Кроме этого  $Eg^{оп}$  растет с увеличением содержания железа в кристаллах  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  (таблица 1), что может быть связано с расщеплением уровней Fe в более широкую подзону при увеличении их количества.

Подтверждением вышесказанному могут быть параметры, полученные на основе исследований магнитной восприимчивости и кинетических коэффициентов. Рассмотрим это на примере кристаллов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  ( $x = 0,095$ ;  $y = 0,005$ ).

На основе зависимостей  $\chi^{-1}_{Mn, Fe} = f(T)$  оценено содержание магнитных примесей (Mn, Fe) в кристалле ( $x + y = 0,1$ ). Оно практически совпало с содержанием ( $x + y$ ) загруженным в ампулу, поскольку образец для исследований вырезали из середины слитка.

Используя зонные параметры кристаллов, полученные на основе кинетических и оптических исследований, построили схему зонной структуры  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  ( $x = 0,095$ ;  $y = 0,005$ ) (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема зонной структуры и энергетические параметры для  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  ( $x = 0,095$ ;  $y = 0,005$ ) при  $T=300K$ ; ( $Ec$  – зона проводимости,  $Ev_1$  – зона легких дырок,  $Ev_2$  – зона тяжелых дырок).

Поскольку электроны с валентной зоны тяжелых дырок под действием квантов электромагнитного излучения переходят на уровни, которые находятся выше уровня Ферми ( $Eg + E_F$ ), а точнее на уровни,

которые лежат выше подзоны, образованной уровнями Fe ( $Eg^{on}$ ) (потому что эти уровни тоже заполнены электронами), то разница ( $Eg^{on} - Eg - E_F$ ) будет отвечать энергетической ширине подзоны, образованной уровнями Fe ( $\Delta E_{Fe}$ ) (в некотором приближении потому что, не известно находится ли уровень Ферми в подзоне железа, или под этой зоной):

$$\Delta E_{Fe} = E_g^{on} - E_g - E_F = 0,03 \text{ эВ.}$$

Поэтому, с учетом всех этих энергетических параметров схема зонной структуры для  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_ySe$  будет иметь вид (рис. 1).

Кинетические коэффициенты кристаллов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  ( $0 < x \leq 0,09$ ;  $y = 0,01$ ), полученных методом Бриджмена, исследованы в интервале температур 77-300 К и в интервале магнитных полей  $H \approx 0-6$  кЭ компенсационным методом на постоянном токе. Закономерности изменения кинетических коэффициентов образцов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  с температурой позволяют сделать предположение, что в основном на явления переноса в этих кристаллах влияют вакансии в подрешётке ртути, междоузельная ртуть и вакансии в подрешётке Те. Известно, что в халькогенидах ртути и твёрдых растворах на их основе междоузельные атомы ртути и вакансии в подрешётке Те – доноры, а вакансии в подрешётке Hg - акцепторы.

Полученные температурные зависимости  $\sigma$  имеют полупроводниковый характер, а температурные зависимости коэффициента Холла ( $R_H$ ) свидетельствуют о том, что в образцах  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  в исследованном интервале температур присутствуют и принимают участие в явлениях переноса, как дырки, так и электроны. Возможное стремление  $R_H$  к инверсии при низких температурах ( $T < 77K$ ) указывает на то что для  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  преобладает р-тип проводимости при низких температурах, а при высоких ( $T > 77K$ ) преобладают отрицательные значения  $R_H$ . Это можно объяснить увеличением в образцах р-типа при повышении температуры концентрации электронов, которые имеют намного большую подвижность, чем подвижность дырок ( $\mu_n \gg \mu_p$ ), что позволяет при  $p > n$  получать отрицательные значения  $R_H$ . Зависимость  $R_H$  кристаллов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  от  $H$  в интервале температур  $T = 77-300$  К и  $H \approx 0-6$  кЭ можно объяснить наличием в образцах минимум двух типов носителей заряда с разной подвижностью и “вымораживанием” более подвижных носителей (электронов) при условии сильного поля ( $\mu^2 B^2 \gg 1$ ). При  $T = 300$  К выполнение условия сильного поля ухудшается, поэтому  $R_H$  слабее зависит от напряжённости магнитного поля при комнатной температуре.

Термоэдс для образцов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$  имеет отрицательное значение и растет по абсолютной величине при повышении температуры, что связано с увеличением концентрации электронов при росте  $T$ . Дело в том, что в образцах со смешанным типом проводимости значение  $\alpha$  обусловлено электронной и дырочной составляющими, которые частично компенсируют друг друга, образуя результирующую  $\alpha$ . Увеличение концентрации электронов при росте температуры приводит к росту вклада электронной составляющей в термоэдс, которая вследствие этого растёт по абсолютной величине.

Относительное магнитсопротивление ( $\Delta\rho/\rho$ ) исследованных образцов  $Hg_{1-x-y}Mn_xFe_yTe$ , величина которого достигает 200% (при  $T = 77K$ ), уменьшается с ростом температуры и почти линейно зависит от напряжённости магнитного поля при  $T = 77$  К. При комнатной температуре зависимости  $\Delta\rho/\rho = f(H)$  – нелинейные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] И.М. Цидильковский. ФТП **24**, 593 (1990).