

- [2] Richardson R.J., Wiswall C.E., Carr P.A.G., Novis F.F., Linenfeld H.V. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. P. 4962-4969.
- [3] Балан Н.Ф., Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Николаев В.Д., Свистун М.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 18. С. 64-67.
- [4] Балан Н.Ф., Гизатуллин Р.М., Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Николаев В.Д., Пичкасов В.М., Свистун М.И. // Квантовая электроника. 1989. Т. 11. С. 2197-2200.
- [5] Бытева И.М., Черников В.С. // Журнал физической химии. 1989. Т. 63. С. 1208-1212.

Физический институт
им. П.Н. Лебедева АН СССР,
Куйбышевский филиал

Поступило в Редакцию
4 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 18

26 сентября 1990 г.

05.2; 07; 12

© 1990

ОПТИЧЕСКИ ДЕТЕКТИРУЕМЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ПОЛУМАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Е.И. Георгицэ, В.В. Дьяконов,
В.И. Иванов-Омский,
В.М. Погорлецкий, Н.Г. Романов,
В.А. Смирнов

Оптическое детектирование магнитного резонанса (ОДМР), использующее зависимость интенсивности оптических переходов от электронной спиновой поляризации состояний, между которыми происходит переход, является прямым методом исследования излучательных спин-зависимых процессов в твердых телах. В настоящее время интенсивно развивается применение ОДМР для исследования рекомбинационных процессов в полупроводниках [1].

Обменное взаимодействие электронов и дырок с электронным остовом атомов марганца в полумагнитных полупроводниках типа $Mn_xHg_{1-x}Te$ существенным образом модифицирует их энергетический спектр в магнитном поле [2]. Покажем, как это обстоятельство может быть использовано для оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР), в частности наблюдения ЭПР акцепторов.

В работе исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) и фотопроводимость (ФП) образцов р-типа с концентрацией $(N_A - N_D) \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (77К) состава $Hg_{0.78}Mn_{0.22}Te$ при температуре 2 К.

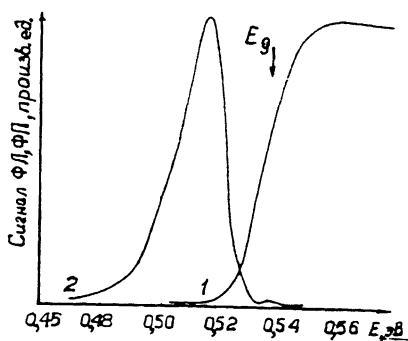


Рис. 1. Спектры ФП (кривая 1) и ФЛ (кривая 2) сплава $Hg_{0,78}Mn_{0,22}Te$ в нулевом магнитном поле при 2 К.

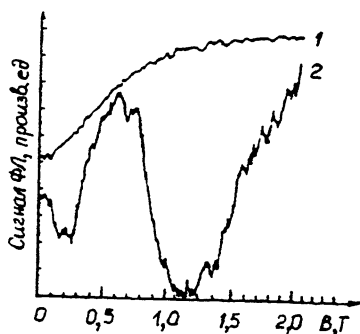


Рис. 2. Зависимость интенсивности фотолюминесценции от магнитного поля (кривая 1) и спектр ОДМР (кривая 2) сплава $Hg_{0,78}Mn_{0,22}Te$ при 2 К.

Выбранный состав, с одной стороны, допускал использование стеклянной оптики, с другой стороны, был достаточно узкозонным, чтобы наблюдалось существенное изменение ФЛ в магнитном поле. Измерения проведены по методике, описанной в работе [1].

На рис. 1 представлены спектры ФЛ (кривая 2) и ФП (кривая 1) исследованного образца при 2 К в нулевом магнитном поле. В спектре ФЛ наблюдается две полосы: слабая высокочастотная и более интенсивная – низкочастотная. Полосы ФЛ смещены друг относительно друга на 20 мэВ. Низкочастотный пик ФЛ расположен ниже края собственной фотопроводимости, что несомненно свидетельствует о его примесной природе. Это заключение находится в соответствии с предложенной ранее интерпретацией низкочастотной полосы, как связанной с переходом зона проводимости–акцептор [3].

На рис. 2 (кривая 1) показана зависимость интенсивности ФЛ от магнитного поля. Наблюдаемый рост интенсивности ФЛ в магнитном поле связан с перестройкой энергетического спектра акцептора под влиянием намагниченности ионов марганца, встроенных внутрь эффективного объема акцептора. В результате этого сечения рекомбинации электронов на дырках, связанных на акцепторе, возрастает что и приводит к росту интенсивности ФЛ в магнитном поле [3]. Если каким-либо независимым способом воздействовать на намагниченность атомов марганца, встроенных в акцептор, то может возникнуть модуляция интенсивности фотолюминесценции. Причем, вследствие обменного взаимодействия дырки с ионами марганца, такая модуляция может быть осуществлена как за счет воздействия на собственный момент дырки, например насыщения линии ее ЭПР, так и за счет воздействия непосредственно на собственный момент ионов Mn^{++} .

Для резонансного перемагничивания собственного момента акцептора (неидентифицированной химической природы) и ионов марганца использовано СВЧ поле с частотой $f = 35.53$ Гц. Образец размещался в резонаторе, помещенном в магнитном поле. Мощность СВЧ поля достигала в наших экспериментах ~ 1 Вт и модулировалась с частотой 300 Гц. Фотолюминесценция возбуждалась аргоновым лазером в непрерывном режиме, и регистрировалась на частоте модуляции СВЧ поля. Предполагалось, что искомый эффект резонансного перемагничивания должен уменьшить интенсивность ФЛ, как это следует из зависимости интенсивности ФЛ от магнитного поля (кривая 1, рис. 2).

На рис. 2 (кривая 2) представлено изменение интенсивности ФЛ под действием СВЧ поля (частота модуляции СВЧ излучения 300 Гц) от постоянного магнитного поля. Наблюдаются две сравнительно широкие резонансные линии. Положение резонансных пиков соответствует полям 0.2 и 1.15 Т. Полуширины наблюдаемых резонансных полос соответственно равны $\Delta B_1 \sim 0.2$ Т и $\Delta B_2 \sim 0.8$ Т.

Первый резонансный минимум, как предполагается, связан с ЭПР дырок, связанных на акцепторе с эффективным g -фактором (12 ± 1). В работе [4] проведен расчет парамагнитного расщепления акцептора для состава $x = 0.14$, результаты которого для g -фактора превышают наблюдаемую нами величину на пол-порядка. Поэтому мы сравним наши экспериментальные данные с расчетом g -фактора свободных дырок в сплаве исследованного состава, в магнитном поле, соответствующем резонансу связанных на акцепторе дырок. Парамагнитный резонанс свободных дырок соответствует переходу $b_h(-1) \rightarrow a_h(-1)$ в схеме Латтицкера [2]. Расчет в модели Пиджена-Брауна с учетом обменного взаимодействия для значения параметров: $N_{0\beta} = 0.8$ эВ, $\mu_1 = 3.3$, $\tilde{f} = 0.3$. $K = 0$ дает величину g -фактора ~ 15 для резонансного поля $B_p = 0.2$ Т. Сделанная оценка g -фактора практически совпадает с определенной нами величиной. Для сравнения отметим, что аналогичная оценка для обычного полупроводника ($N_{0\beta} = 0$) с равным значением ширины запрещенной зоны и других параметров энергетического спектра дает величину ~ 0.58 .

Второй резонанс наблюдается в поле 1.15 Т. В отличие от первой резонансной линии, эта полоса более широкая и интенсивная. g -фактор, оцененный по положению данной линии, оказался равным 2.1. Для измеряемого в работе [5] g -фактора ионов марганца получено значение 2.006. Если связывать наблюдаемое различие g -факторов с проявлением внутреннего магнитного поля, то его величина в сплаве $Hg_{0.78}Mn_{0.22}Te$ оказывается равной ~ 0.06 Т. Вторая резонансная линия, наблюдаемая в спектре, может быть приписана магнитодипольному резонансу ионов марганца Mn^{++} .

Анализ формы линии магнитодипольного резонанса позволяет оценить время спиновой релаксации. Действительно, полуширине линии порядка $\Delta B_2 \sim 0.3$ Т, соответствуют времена спиновой релаксации

$$\tau_g = \frac{\hbar}{\mu_B g_{Mn}^* \Delta B_2} \approx 6.5 \cdot 10^{-12} \text{ с.}$$

Нетрудно убедиться, что полуширина первого резонанса, связанного с дыркой на акцепторе, дает близкую величину $\tau_g \sim 5 \cdot 10^{-12}$ с. Совпадение времен спиновой релаксации для дырки на акцепторе и для иона марганца следует ожидать благодаря их сильному обменному взаимодействию.

Таким образом, впервые оказалось возможным наблюдение парамагнитного резонанса акцепторов и ионов марганца Mn^{++} в сплаве с высоким их содержанием, что связано с тремя обстоятельствами: 1) большая величина эффективного g -фактора акцептора в полумасштабном полупроводнике; 2) использование высокочувствительной методики ОДМР; 3) использование высокой частоты (ω) для резонансного размагничивания, при которой добротность резонанса достигала величины $\omega \tau_g \approx 1.5$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Баранов П.Г., Романов Н.Г. // Изв. АН СССР серия физическая. 1986. Т. 50. № 2. С. 224-227.
- [2] Furdyna J.K // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 4. P. 29-63.
- [3] Гельмонт Б.Л., Голонска Р.Р., Вахабова Э.М., Иванов-Омский В.И., Постолки И.Т., Смирнов В.А. // ФТП. 1985. Т. 20. №1. С. 73-79.
- [4] Gawron T.R. // Acta Phys. Polonica. 1986. V. A69. N 6. P. 1029-1033.
- [5] Мастеров В.Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С.3-23.

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

Поступило в Редакцию 8 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 18

26 сентября 1990 г.

03

© 1990

ИНДУКЦИОННАЯ ЗАРЯДКА КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ЧАСТИЧНОМ СЛИЯНИИ

В.И. Красницкий, А.М. Апасов, С.М. Контущ

В физике грозовых явлений слабо изучен вопрос о разделении зарядов в теплых грозовых облаках. В них не действуют механиз-