

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВЯЗАННЫХ ДИАМАГНИТНЫХ ЭКСИТОНОВ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ

И. В. Кавецкая, Н. Н. Сибельдин

Обнаружено, что в магнитное поле напряженностью  $H \geq 5 \div 7$  кЭ в спектре люминесценции антимонида индия возгорается узкая линия излучения экситонно-примесных комплексов (ЭПК), которая в сильном магнитном поле доминирует в спектре.

В антимониде индия уже в слабом магнитном поле (около 1 кЭ) экситоны являются диамагнитными, т. е. циклотронная энергия электрона превышает экситонный ридберг <sup>1</sup>. Диамагнитные экситоны сильно анизотропны: их волновая функция вытянута вдоль поля и сжата в перпендикулярном направлении. По-видимому, система диамагнитных экситонов может оказаться удобным объектом для моделирования свойств атомов, молекул и вещества в сверхсильном магнитном поле. Однако, сведения о взаимодействиях и коллективных явлениях в системе диамагнитных экситонов практически отсутствуют. В <sup>2</sup> мы сообщали о наблюдении в антимониде индия люминесценции электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), стабилизированной магнитным полем <sup>3</sup>. В работе <sup>4</sup> рассматривалась локализация диамагнитных экситонов на примесях. Было показано, что в магнитном поле возможно образование ЭПК на дефектах, которые не могли связать экситон в отсутствии поля. При этом, также как и ЭПК в отсутствии магнитного поля <sup>5</sup>, связанные диамагнитные экситоны имеют гигантскую силу осциллятора.

В этой статье приводятся результаты исследования низкотемпературной магнитофотолюминесценции достаточно чистых кристаллов антимонида индия. Полученные данные показывают, что доминирующим каналом излучательной рекомбинации в сильном магнитном поле является рекомбинация связанных диамагнитных экситонов. Следует отметить, что недавно были опубликованы результаты аналогичных исследований <sup>6</sup>. Однако, наши данные существенно отличаются от результатов этой работы.

Основные эксперименты были выполнены на образцах *n*-InSb размером  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  и толщиной  $100 \div 200 \text{ мкм}$  с концентрацией электронов при азотной температуре  $(1 \div 2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и с компенсацией около 50 %. После механической полировки образцы травились в CP-4A. Источником квазистационарного фотовозбуждения служил Не – Ne-лазер с длиной волны  $3,39 \text{ мкм}$  и мощностью  $\sim 15 \text{ мВт}$ . Спектры люминесценции и магнитоотражения анализировались монохроматором МДР-2 с решеткой 100 штрих/мм и регистрировались либо фотосопротивлением Ge : Au, либо фотодиодом из InSb, охлаждавшимися до температуры  $\sim 100 \text{ К}$ . Магнитное поле создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида. Измерения, в основном, проводились при температуре 2 К в геометрии Фарадея. Магнитное поле было направлено перпендикулярно широкой грани образца вдоль кристаллографической оси  $<211>$ .

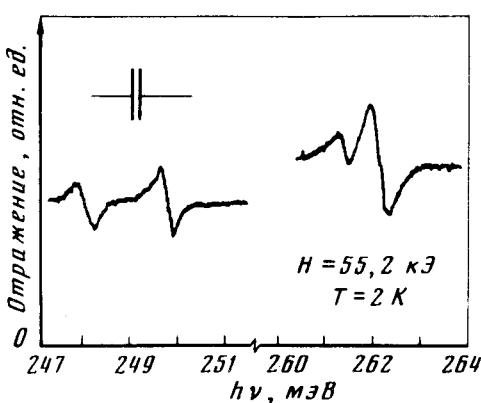
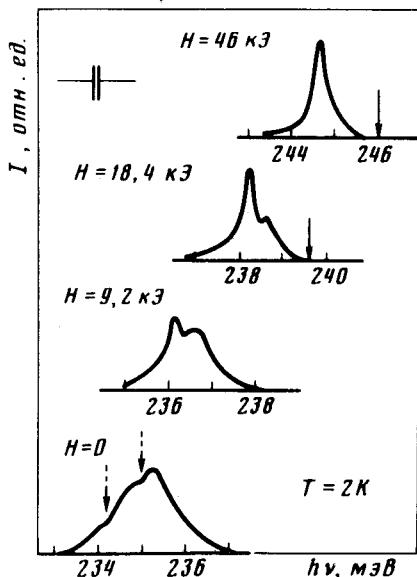


Рис.2. Спектр экситонного магнитоотражения

Рис.1. Спектры люминесценции при различных напряженностях магнитного поля. Сплошные стрелки – позиция центра длинноволновой компоненты спектра экситонного магнитоотражения. Пунктирные стрелки ( $H = 0$ ) – положение линий поглощения атмосферных паров воды

Спектры люминесценции при различных напряженностях магнитного поля показаны на рис.1. Эти спектры записаны при интенсивности возбуждения  $\sim 10 \text{ Вт/см}^2$ , которая примерно на порядок меньше интенсивности возбуждения, требуемой для наблюдения ЭДЖ <sup>2</sup>. Линия излучения, наблюдавшаяся в отсутствии магнитного поля, обычно приписывается межзонным излучательным переходам. Однако, эта линия смешена в длинноволновую сторону от линии экситонного поглощения ( $h\nu_{ex} = 236,3 \text{ мэВ}$  <sup>7</sup>). По-видимому, длинноволновый сдвиг обусловлен кулоновским взаимодействием между неравновесными носителями, а также между носителями и заряженными примесями.

С ростом напряженности магнитного поля линия люминесценции сдвигается в коротковолновую сторону, сужается и уменьшается по интенсивности. При  $H \cong 5 \div 7 \text{ кЭ}$  на ее

длинноволновом крыле возгорается узкая линия, которая в достаточно сильном поле доминирует в спектре.

Для того, чтобы определить энергии переходов в состоянии свободного диамагнитного экситона, были измерены спектры магнитоотражения (рис.2). Позиции длинноволновой компоненты спектра магнитоотражения показаны на рис.1 сплошными стрелками.

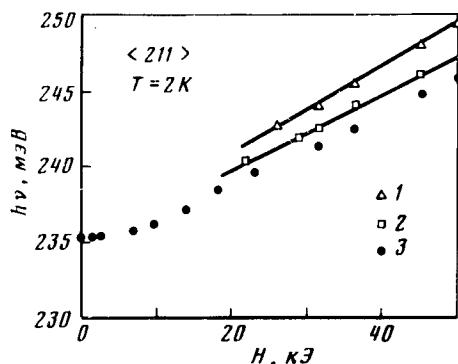


Рис.3. Зависимости спектрального положения длинноволновых линий экситонного магнитоотражения (1, 2) и максимума линии люминесценции ЭПК (3) от напряженности магнитного поля. Сплошные линии – теория<sup>8</sup>

На рис.3 приведены зависимости спектрального положения двух длинноволновых линий экситонного магнитоотражения и максимума линии излучения, возгорающейся в магнитном поле (за исключением первых трех точек вблизи  $H = 0$ , которые дают позицию максимума коротковолновой линии излучения), от напряженности магнитного поля. Из рис.2 и рис.3 видно, что спектр люминесценции сдвинут в сторону меньших энергий от красной границы экситонного спектра. Сдвиг узкой длинноволновой линии излучения составляет  $\cong 1$  мэВ в поле  $H = 23$  кЭ.

Измерения, проведенные при различных интенсивностях возбуждения и температурах, показали, что интенсивность длинноволновой линии излучения вначале линейно увеличивается с ростом уровня возбуждения, а затем ее рост существенно замедляется. При увеличении температуры от 2 до 4,2 К интенсивность длинноволновой линии резко уменьшается, а коротковолновой – слегка возрастает.

Совокупность полученных экспериментальных данных: спектральное положение длинноволновой линии излучения, ее высокая интенсивность и малая полуширина ( $\cong 0,3$  мэВ), близкий к квадратичному коротковолновый сдвиг с ростом напряженности поля (при малых  $H$ ), характер зависимости интенсивности от уровня какачки и температуры и поведение в электрическом поле<sup>2</sup>, позволяет заключить, что эта линия связана с рекомбинацией ЭПК. По-видимому, обнаруженный ЭПК – это диамагнитный экситон, связанный на нейтральном акцепторе Zn или Cd, энергия ионизации которых  $\sim 9$  мэВ. Косвенным доводом в пользу возможного участия этих акцепторов в образовании ЭПК является то обстоятельство, что на исследованных образцах мы наблюдали слабую линию излучения, отвечающую электронным переходам из зоны проводимости на акцепторные уровни с близкой энергией. Следует заметить, что поскольку в антимониде индия электронный  $g$ -фактор очень велик ( $g_e \cong 50$ ), ЭПК на нейтральных донорах едва ли будут устойчивы в магнитном поле, подобно тому, как это имеет место для биэкситонов в германии<sup>9</sup>, когда энергия несвязанного триплетного состояния молекулы при увеличении поля становится меньше, чем синглетного.

Зависимость положения максимума коротковолновой линии люминесценции от напряженности магнитного поля имеет почти такой же характер, как для линии излучения ЭПК, а расстояние между максимумами этих линий менее 1 мэВ. Так как в антимониде индия электроны значительно легче дырок, энергия связи экситона близка к энергии ионизации мелких доноров. Поэтому можно сделать вывод, что коротковолновая компонента спектра люминесценции отвечает переходам с донорных уровней в валентную зону. Сравнительно большая полуширина этой линии ( $> 1$  мэВ) вероятно связана с разбросом донорных уровней из-за флуктуаций концентрации заряженных примесей.

Мы глубоко признательны Л.В.Келдышу за постоянное внимание и многочисленные обсуждения. Мы благодарны В.Д.Кулаковскому, В.Б.Стопачинскому, В.Б.Тимофееву и А.П.Шоттову за обсуждение, Б.А.Добышу, Н.В.Замковец и В.А.Цветкову за помощь при проведении экспериментов, Ал.Л.Эфросу за расчет экситонного спектра и М.Н.Кеворкову и А.Н.Попкову за предоставление образцов.

### Литература

1. Захарченя Б.П., Сейсян Р.П. УФН, 1969, 97, 193.
2. Кавецкая И.В., Кость Я.Я., Сибельдин Н.Н., Цветков В.А. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 254.
3. Келдыш Л.В., Онищенко Т.А. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 70; Андрюшин Е.А., Бабиченко В.С., Келдыш Л.В., Онищенко Т.А., Силин А.П. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 210.
4. Харченко В.А., ЖЭТФ, 1982, 83, 1971.
5. Рашба Э.И., Гургенишвили Г.Э. ФТТ, 1962, 4, 1029; Рашба Э.И. ФТП, 1973, 8, 1241.
6. Иванов-Омский В.И., Кохановский С.И., Сейсян Р.П., Смирнов В.А., Юлдашев Ш.У. ФТП, 1983, 17, 532.
7. Канская Л.М., Кохановский С.И., Сейсян Р.П. ФТП, 1979, 13, 2424.
8. Гельмонт Б.Л., Сейсян Р.П., Эфрос Ал.Л., Варфоломеев А.В. ФТП, 1977, 11, 238.
9. Кулаковский В.Д., Кукушкин И.В., Тимофеев В.Б. ЖЭТФ, 1981, 81, 684.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
3 июня 1983 г.