

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.В.Кавецкая, Я.Я.Кость, Н.Н.Сибельдин, В.А.Цветков

В спектрах магнитофотолюминесценции чистых кристаллов антимонида индия при высоких уровнях возбуждения обнаружена новая полоса излучения, связанная с распадом электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), стабилизированной магнитным полем.

В антимониде индия электронная эффективная масса, а следовательно, и энергия связи экситона чрезвычайно малы. Поэтому экситонные линии в спектрах поглощения¹ и отражения², наблюдаются как правило, лишь при наложении сравнительно сильного магнитного поля, наличие которого приводит к увеличению энергии ионизации экситона. В работах^{3,4} было показано, что в достаточно сильных магнитных полях плотная электронно-дырочная плазма „самосжимается” под действием кулоновских сил, т.е. энергия на пару частиц плазмы как функция плотности электронно-дырочных пар имеет минимум. При этом энергия на пару частиц может оказаться по абсолютной величине больше энергии связи экситона, и образование ЭДЖ в магнитном поле будет энергетически более выгодным. В этой статье мы сообщаем о наблюдении рекомбинационного излучения ЭДЖ, стабилизированной магнитным полем.

Эксперименты были выполнены на образцах n -InSb размером 5×5 мм² и толщиной $100 \div 250$ мкм с концентрацией электронов при азотной температуре $(1 \div 2) \cdot 10^{14}$ см⁻³. После механической полировки образцы травились в CP-4A. Источником квази стационарного фотовозбуждения служил лазер на Nd³⁺ YAG ($\lambda = 1,06$ мкм, мощность ~ 1 Вт). Спектр люминесценции анализировался монохроматором МДР-2 с решеткой 100 штрих/мм и регистрировался фотоспротивлением Ge: Au, охлаждавшимся до ~ 100 К. Магнитное поле до 60 кЭ создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида. Все измерения проводились при температуре 2 К в геометрии Фарадея. Магнитное поле было направлено перпендикулярно широкой грани образца.

При низких уровнях возбуждения в магнитных полях больших ~ 7 кЭ спектр рекомбинационного излучения состоит из двух хорошо разрешенных линий (рис.1; вставка). Длинноволновая компонента спектра, по-видимому, связана с излучательным распадом экситонно-примесных комплексов (ЭПК)¹. Интенсивность люминесценции ЭПК вначале линейно увеличивалась с ростом уровня возбуждения, а затем ее рост существенно замедлялся. Более того, возрастание интенсивности свечения ЭПК происходило, в основном, за счет областей кристалла, удаленных от центра области генерации неравновесных носителей. В то же время линия уширялась в длинноволновую сторону и у нее появлялся хвост, простирающийся в область низких энергий фотонов (рис.1, спектр 1).

Уширение линии с ростом уровня накачки можно связать с появлением в спектре новой полосы излучения на длинноволновом краю линии люминесценции ЭПК. Эту полосу можно выделить, воспользовавшись тем обстоятельством, что интенсивность свечения ЭПК слабо зависит от уровня возбуждения. Спектр люминесценции, записанный при 20%-ной глубине модуляции интенсивности возбуждающего света, представлен кривой 2 на рис.1. Приведенный спектр перестроен из полученного экспериментально таким образом, чтобы интенсивность линии соответствовала глубине модуляции 100%. Спектр 3 получен как разность спектров 1 и 2. Для того, чтобы уменьшить вклад излучения ЭПК в интегральную интенсивность люминесценции, при записи спектров 1 и 2 наблюдение велось из ограниченной области кристалла размерами $0,3 \times 0,4$ мм², в которой плотность возбуждения была наибольшей.

1) Результаты исследований магнитофотолюминесценции при низких уровнях возбуждения будут опубликованы отдельно.

Другая возможность выделить длинноволновую полосу излучения, возникающую при сильной накачке – приложить слабое электрическое поле. Электрическое поле было приложено в направлении перпендикулярном к магнитному, для чего на узкие грани образца были нанесены индиевые контакты. При напряжении на образце 5 В линии излучения, показанные на вставке рис.1, существенно уменьшались, а при напряжении 10 В полностью исчезали. В то же время, интенсивность длинноволновой полосы возрастала. Влияние электрического поля проиллюстрировано на рис.2. Спектр 2 (пунктир) прописан при 20%-ной модуляции интенсивности возбуждающего излучения. Причем интенсивность возбуждения была не слишком велика, так что излучение ЭПК дает еще заметный вклад в суммарную интенсивность излучения. При включении электрического поля спектр изменяется вследствие пробоя ЭПК (сплошная линия), однако, форма длинноволнового края обоих спектров одинакова.

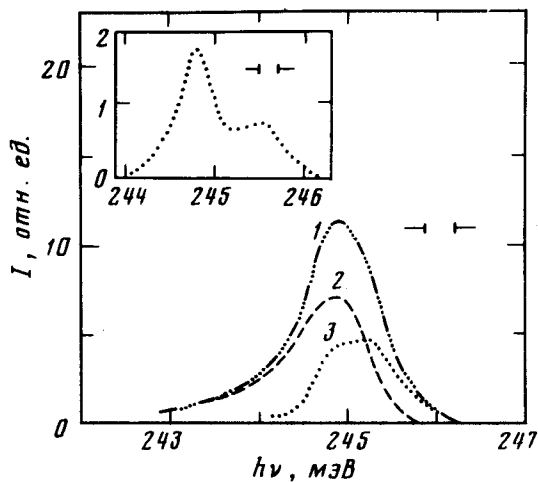


Рис.1 Спектры излучения при высоком (500 Вт / см^2) и низким (на вставке) уровнях возбуждения в магнитном поле напряженностью 46 кЭ. Обозначения спектров разъяснены в тексте

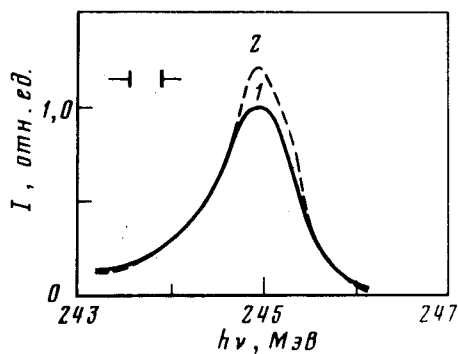


Рис. 2

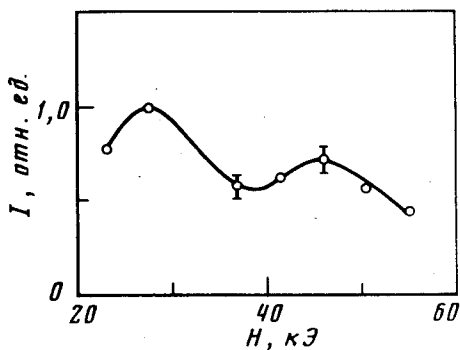


Рис. 3

Рис.2. Влияние электрического поля на спектр люминесценции. Спектр 2 – электрическое поле не включено. Напряженность магнитного поля 46 кЭ

Рис.3. Зависимость интенсивности излучения ЭДЖ от магнитного поля

Неизменность формы и увеличение интенсивности длинноволновой полосы при включении электрического поля показывают, что эта полоса связана с рекомбинацией электронно-дырочной плазмы (ЭДП).

На рис.3 приведена зависимость интенсивности излучения ЭДП от напряженности магнитного поля. Осцилляционный характер этой зависимости, по-видимому, связан с прохождением

ем. уровня Ландау тяжелых дырок (из-за малой эффективной массы и большой величины g -фактора электронов все электроны находятся на нижнем спиновом подуровне нулевой зоны Ландау) через дырочный уровень Ферми. Наблюдавшиеся осцилляции убедительно свидетельствуют о фермиевском вырождении в ЭДП.

Коротковолновая граница спектра излучения ЭДП смещена на $\phi \cong 0,5$ мэВ от красной границы спектра экситонного магнитоотражения (в поле 46 кЭ). Таким образом, спектральное положение длинноволновой полосы излучения и ее поведение в магнитном и электрическом полях позволяют заключить, что это излучение связано с рекомбинацией ЭДЖ, стабилизированной магнитным полем.

В заключение отметим, что грубая оценка плотности ЭДЖ по ширине линии излучения $n_0 \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, хорошо согласуется с оценкой, которую можно провести по формулам работы³. Хотя при наших экспериментальных условиях эти формулы находятся на пределе применимости.

Мы глубоко признательны за внимание и полезные обсуждения Л.В. Келдышу, по инициативе которого была поставлена эта работа. Мы благодарны В.Б.Стопачинскому и А.П. Шотову за обсуждение, К.Ф. Миннебаеву и В.М. Морковину за помощь в создании экспериментальной установки, Н.В. Замковец и Е.Г. Чижевскому за помощь при проведении экспериментов и М.Н. Кеворкову и А.Н. Поткову за предоставление образцов.

Литература

1. Zwerdling S., Kleiner W.H., Theriault J.P. J. Appl. Suppl., 1961, 32, 2118.
2. Pidgeon C.R., Groves S.H. Труды IX Международной конференции по физике полупроводников, М., 1968, 327.
3. Келдыш Л.В., Онищенко Т.А. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 70.
4. Андрюшин Е.А., Бабиченко В.С., Келдыш Л.В., Онищенко Т.А., Силин А.П. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 210.