

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭКСИТОНОВ В ЗАКИСИ МЕДИ

В.Ф.Алекян, Н.Н.Васильев, Ю.А.Степанов

Исследован спектр поглощения Cu_2O при высокой концентрации свободных носителей, созданных двухфотонным световым возбуждением. Наблюдалась последовательная диссоциация экситонов вплоть до $n = 3$ и сужение запрещенной зоны при малом абсолютном смещении экситонных линий.

Имеется несколько механизмов, способных влиять на спектр поглощения кристалла при создании в нем высокой плотности носителей. Точная оценка всех возможных вкладов является нереальной, и по этой причине непросто предсказать экспериментальный результат, суммирующий эти вклады. Следует иметь в виду, что абсолютная энергия экситонного резонанса определяется как величиной кулоновского взаимодействия, так и шириной запрещенной зоны, являющимися функциями концентрации свободных носителей.

Многочисленным экспериментальным исследованиям экранирования при возбуждении кристаллов светом, (например, [1 – 5]) присущи серьезные общие недостатки. Они проводились на спектрах люминесценции и отражения кристаллов с прямым разрешенным переходом при возбуждении в зону, $h\nu > \epsilon_g^0$. В таких условиях возбуждается лишь слой с толщиной $10^{-5} - 10^{-6}$ см, и фактически изучаются не объемные, а поверхностные свойства, к тому же в условиях сильно неоднородного по глубине возбуждения. Если же изучать спектры поглощения таких кристаллов, то для однородного по глубине однофотонного возбуждения требуются образцы с толщиной не более $10^{-4} - 10^{-5}$ см, и в этом случае влияние приповерхностных областей снова весьма существенно.

Исключив из рассмотрения поверхностные эффекты, можно привести следующие причины изменения спектра поглощения при больших n_{eh} : 1) экранирование кулоновского взаимодействия – уменьшение энергии связи и силы осциллятора экситона; 2) усиление обменного взаимодействия свободных носителей; 3) эффект Бурштейна – Мосса; 4) экранирование взаимодействия носителей с примесями; 5) ослабление поляронного эффекта.

К этим обычно рассматриваемым воздействиям следует добавить ослабление правил отбора по импульсу при больших n_{eh} и возможность поглощения квантов света с энергией, меньшей ϵ_g^0 , как это имеет место, например, при взаимодействии фотонов с фононами или при туннелировании в электрическом поле: значительная концентрация горячих носителей допускает поглощение кванта с энергией меньше ϵ_g^0 с одновременным охлаждением одного из горячих свободных носителей.

Закись меди является удобным объектом для исследования спектра поглощения при сильном возбуждении. Многочисленная желтая серия содержит состояния с разными по порядку радиусами и энергиями связи. Малый коэффициент поглощения позволяет регистрировать спектр толстых образцов, где поверхностные эффекты несущественны. Наконец, около края поглощения исследованных образцов очень слабы люминесценция и хвосты примесного поглощения.

В нашем эксперименте спектр поглощения Cu_2O ($\epsilon_g^0 = 2,17$ эВ) при $T = 4$ и 77 К регистрировался импульсным синхронным детектированием. Генерация носителей осуществлялась двухфотонным способом – первой гармоникой YAG – Nd³⁺-лазера, $h\nu = 1,17$ эВ, на частоте которой поглощение в наших образцах практически отсутствует. Коэффициент двухфотонного поглощения $K = 0,3I_0$ см⁻¹, где I_0 – интенсивность возбуждения у поверхности. K достаточно велик для полу-

чения высокой концентрации n_{eh} , но в то же время при накачках меньших 60 МВт/см^2 образец с толщиной 40 мкм можно считать равномерно возбужденным по глубине.

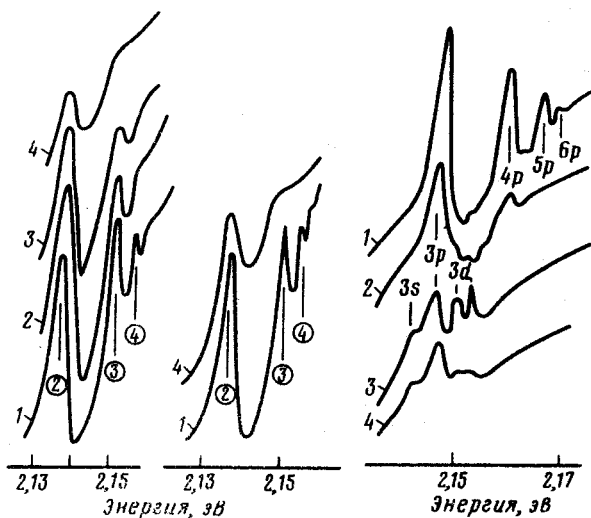


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 1. Экранирование экситонных линий по мере увеличения плотности возбуждения: 1 — $I_0 = 0$; 2 — $I_0 = 20$; 3 — $I_0 = 40$; 4 — $I_0 = 60 \text{ МВт/см}^2$. (цифры в кружках — главные квантовые числа n). Справа приведены две кривые при одном положении нуля $T = 4 \text{ К}$

Рис. 2. Экранирование экситонов при внешнем электрическом поле $F = 0$ [1, 2] и $F = 5 \text{ кВ/см}$ [3, 4]. Плотность возбуждения $I_0 = 0$ [1, 3] и $I_0 = 20 \text{ МВт/см}^2$ [2, 4]. $T = 4 \text{ К}$

По мере увеличения I_0 наблюдается сдвиг края поглощения в длинноволновую сторону (сужение запрещенной зоны) и последовательная диссоциация экситонных линий (рис. 1). Время жизни свободных носителей и экситонов, оцененное по данным циклотронного резонанса и кинетики люминесценции, близко к 10^{-9} сек. Измерения плотности мощности падающего излучения и значений K позволяют оценить n_{eh} , при которых происходит исчезновение экситонных линий с определенным квантовым числом n :

n	5	4	3
n_{eh} эксп	$9 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{16}$	$7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
n_{eh} теор	$3 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Критическое рассмотрение теоретических исследований спектра в условиях экранирования показало, что в нашем случае следует ориентироваться на работы Эгри [6] и Гейя [7]. Из таблицы видно, что для $n = 3, 4$ опытные значения в несколько раз превышают теоретические. Расхождение не удивительно, если иметь в виду простые предпосылки теории и погрешности в определении мощности возбуждения и момента диссоциации. Однако для $n = 5$ большей является, напротив, теоретическая оценка. Причину следует искать во влиянии электрических полей несовершенств решетки и температуры — фактически граница сплошного спектра сдвинута относительно ϵ_g^0 рассчитанного по экситонной

серии, и это, в первую очередь, сказывается на состояниях с малой энергией связи. Влияние внешнего электрического поля F на условия экранирования демонстрируется на рис. 2: при $F = 5$ кВ/см световое возбуждение сильно экранирует $3d$ -линии, но при $F = 0$ влияние того же возбуждения на линию с $n = 3$ незначительно.

Ранее в некоторых работах наблюдался сильный сдвиг экситонных максимумов в отражении, фотопроводимости к люминесценции без существенного изменения формы линий и силы осциллятора. На первый взгляд, это согласуется с теорией экранирования Дебая — Хюккеля, но согласие нарушается, если учесть сужение запрещенной зоны. Истинной причиной наблюдавшегося в [1, 2] сдвига является изменение зависимости энергии экситонного резонанса от глубины [8] при освещении кристалла.

Существенным результатом нашего опыта является отсутствие заметных сдвигов экситонных линий — сужение запрещенной зоны и уменьшение энергии связи экситонов вплоть до диссоциации последних приблизительно компенсируют друг друга.

Институт физики
Ленинградского
государственного университета
им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию
11 ноября 1980 г.

Литература

- [1] K.Colbow, D.W.Nyberg. Phys. Lett., A25, 250, 1967.
- [2] W.A.Albert. Phys. Rev. Lett., 23, 410, 1969.
- [3] J.Heidmann, T.Skettrey. Solid State Comm., 23, 27, 1977.
- [4] T.Ugumori, K.Masuda, S.Namba. Phys. Stat. Sol. (a), 43, 151, 1977.
- [5] A.Kurosawa, H.Saito, S.Shionoya. Phys. Stat. Sol. (b), 96, 483, 1979.
- [6] I.Egri. Solid State Comm., 32, 1017, 1979.
- [7] J.G.Gay. Phys. Rev., B4, 2567, 1971.
- [8] Н.А.Давыдова, Э.Н.Мясников, М. И. Страшникова. ФТТ. 15, 3332, 1973.