

ОСОБЕННОСТИ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВОБОДНЫХ МНОГОЭКСИТОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

П.И.Хаджи, С.А.Москаленко

Рассмотрены особенности формы полос поглощения и люминесценции свободных многоэкситонных комплексов в полупроводниках.

При низких температурах и высоких уровнях возбуждения кристалла взаимодействие между экситонами приводит к появлению новых полос люминесценции. В физике экситонов последние годы ознаменовались интенсивным изучением биэкситонов [1] и электронно-дырочных капель [2]. недавно экспериментально были обнаружены связанные с примесью многоэкситонные комплексы [3, 4]. В спектрах люминесценции такие комплексы проявляются в "частотоле" узких линий с различной интенсивностью и изменяющимся расстоянием между ними. На примеси Li в [3] обнаружены комплексы, содержащие до десяти экситонов. Уширение линий излучения связанных многоэкситонных комплексов обусловлено участием в процессе излучения фононов.

Совершенно очевидно, что благодаря силам притяжения между свободными экситонами последние также могут связываться, образуя свободные многоэкситонные комплексы (СМЭК). Простейшим примером такого комплекса, в сущности, является биэкситон. Другим предельным случаем является экситонная (диэлектрическая) капля. Центры тяжести СМЭК должны обладать определенными волновыми векторами трансляционного движения. Из-за малой энергии связи такого комплекса он может существовать при очень низких температурах.

Обсудим форму линий люминесценции и поглощения СМЭК. В результате излучательной рекомбинации одного из экситонов ($n + 1$)-экситонный комплекс может превратиться в n -экситонный комплекс. Такая рекомбинация может продолжаться до тех пор, пока не аннигилирует последний экситон. При этом расстояние между последовательными линиями излучения будет изменяться так как изменяется удельная энергия связи I_n (энергия связи, приходящаяся на один экситон комплекса) для различных значений n . Так, например, для биэкситона удельная энергия связи I_2 отличается от энергии связи $1s$ -экситона I_{1s} на величину $\frac{1}{2}I_m$, где I_m — энергия связи двух экситонов в биэкситон. На самом деле в кристалле могут сосуществовать комплексы с различным числом экситонов. Люминесценция их приведет к появлению "частотола" узких линий, положение и полуширина каждой из которых соответствует определенному значению n .

Для определения формы полосы люминесценции необходимо знание волновой функции комплекса. Однако, как показано в [5], форму полосы люминесценции определяет не волновая функция биэкситона, а функция распределения биэкситонов по импульсам. Это обусловлено малостью энергии связи биэкситона, что в свою очередь определяет верхнюю гра-

ницу температур его существования. Предположим, что свободные $(n + 1)$ -экситонные комплексы термализованы и характеризуются максвелловской функцией распределения по импульсам с температурой T . Рассматривая полупроводник с прямыми разрешенными оптическими переходами, для формы полосы люминесценции $f(\omega)$ с превращением $(n + 1)$ -экситонного комплекса в n -экситонный получаем

$$f(\omega) \sim G_{n+1, n}^{1/2} \exp\left(-n \frac{G_{n+1, n}}{k_0 T}\right), \quad (1)$$

где

$$G_{n+1, n} = \hbar(\omega_0 - \omega). \quad \hbar\omega_0 = E_g + nI_n - (n + 1)I_{n+1}, \quad (2)$$

E_g — ширина запрещенной зоны.

Из (1) и (2) видно, что люминесценция комплекса происходит только в длинноволновой области от граничной частоты ω_0 . Последняя смещена относительно линии экситонного поглощения в длинноволновую сторону на величину $\Delta = (n + 1)I_{n+1} - nI_n - I_{1s}$. По мере уменьшения числа экситонов в комплексе в процессе рекомбинации граничная частота будет сдвигаться в коротковолновую область, если считать, что I_n монотонно растет с увеличением n , стремясь к определенному пределу. Существенное отличие люминесценции СМЭК от связанных многоэкситонных комплексов состоит в том, что полоса излучения обладает шириной, которая обусловлена кинетической энергией движения центра тяжести комплекса. Максимум полосы сдвинут в длинноволновую область от граничной частоты на величину $\Delta(\hbar\omega) = k_0 T / 2n$. Полуширина линии излучения также обратно пропорциональна n . С ростом n максимум полосы все более сдвигается к граничной частоте, а ее полуширина уменьшается, стремясь к "естественной" ширине линии. Последнее явление аналогично эффекту Мессбауэра на каплях [6]. Наличие полого длинноволнового хвоста связано со структурой зон трансляционного движения комплекса в начальном и конечном состояниях. С уменьшением температуры максимум полосы растет и сдвигается в коротковолновую сторону, а полуширина убывает. При $T \rightarrow 0$ форма полосы люминесценции приобретает характер δ -функции. Как и для биэкситонов [5], процесс излучательной рекомбинации СМЭК должен характеризоваться большой силой осциллятора.

Если рассматривать обратный процесс — поглощение света с превращением свободного n -экситонного в $(n + 1)$ -экситонный комплекс, то для формы полосы поглощения $g(\omega)$ можно получить выражение

$$g(\omega) \sim G_{n+1, n}^{1/2} \exp\left[-(n + 1) \frac{G_{n+1, n}}{k_0 T}\right] \quad (3)$$

Максимум полосы поглощения сдвинут в длинноволновую область от граничной частоты ω_0 на величину $\Delta(\hbar\omega) = \frac{k_0 T}{2(n + 1)}$. Сравнивая (3)

с (1), можно сделать вывод о том, что поведение полосы поглощения аналогично поведению полосы люминесценции.

Отмеченные здесь закономерности будут проявляться в случае, если "естественная" полуширина, обусловленная рассеянием на фононах, не будет превышать полуширину, связанную с движением центра тяжести комплекса. Для наблюдения СМЭК в спектрах люминесценции необходимо, чтобы экситонная линия была очень узкой, например, такой, как линия $n = 1$ желтой серии в Cu_2O .

Институт прикладной физики
Академии наук Молдавской ССР

Поступила в редакцию
12 сентября 1974 г.

Литература

- [1] H.Souma, K.Suzuki, M.Ueta. J.Phys. Soc. Japan, 30, 581, 1971.
 - [2] J.Voigt, I.Rückmann. Phys. Stat. Sol. (b), 61, K85, 1974.
 - [3] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, 9, 435, 1969; ФТП, 4, 491, 1970.
 - [4] R.W.Martin. Solid State Comm., 14, 369, 1974.
 - [5] А.А.Гоголин, Э.И.Рашба. Письма в ЖЭТФ, 17, 690, 1973; А.А.Гоголин. ФТТ, 15, 2746, 1973.
 - [6] С.А.Москаленко. Бозе-эйнштейновская конденсация экситонов и би-экситонов. РИО АН МССР, Кишинева, 1970.
-