

- [1] Морийя Т. Спиновые флуктуации в магнетиках с коллективизированными электронами. М.: Мир, 1988. 287 с.
- [2] Lowde R.D., Moon R.M., Pagonic B., Perry C.H., Sokoloff J.B., Vanghan-Watkins R.S., Wiltshire M.C.K., Crangle J. // J. Phys. F. 1983. V. 13. N 1. P. 249-279.
- [3] Sokoloff J.B., Li W.H., Pagonis B., Perry C.H., Majkrzak C.F., Shirane G., Ishikawa Y. // Sol. State Comm. 1984. V. 52. N 7. P. 693-696.
- [4] Sokoloff J.B. // J. Phys. F. 1975. V. 5. N 10. P. 1946-1956.
- [5] Edwards D.M. // J. Magn. Magn. Mater. 1980. V. 15-18. N 1. P. 262-268.
- [6] Shastry B.S., Edwards D.M. // J. Phys. C. 1981. V. 14. N 2. P. L665-L670.
- [7] Гельд П.В., Повзнер А.А., Лихачев Д.В. // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 86-90.
- [8] Повзнер А.А., Волков А.Г. // ФММ. 1988. Т. 66. № 6. С. 1073-1082.
- [9] Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: ГИФМЛ, 1962. 444 с.
- [10] Волков А.Г., Повзнер А.А., Гельд П.В. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 6. С. 1675-1677.

Уральский государственный
технический университет
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
30 марта 1993 г.

УДК 537.311.33

© Физика твердого тела, том 35, № 11, 1993
Solid State Physics, vol. 35, N 11, 1993

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭКСИТОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ $Ga_{1-x}In_xSe$

М.О.Годжаев, Н.Б.Кахраманов, Р.А.Сулейманов

В серии работ, опубликованных в последние годы [1,2], сообщалось о наблюдении в спектрах спонтанного излучения слоистых кристаллов $InSe$ и $GaSe$ электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) при высоких уровнях оптического возбуждения.

В [3] был исследован спектр стимулированного излучения этих кристаллов в условиях образования ЭДЖ. Было показано, что спектр стимулированного излучения вполне определенно коррелирует с возникновением ЭДЖ, что указывало на правомочность представлений об эффективности процессов усиления света в ЭДЖ [4]. В то же время конкретные механизмы стимулированного излучения оказались зависящими от степени совершенства исследуемых кристаллов. Последнее обстоятельство особенно актуально в кристаллах $InSe$ и $GaSe$, имеющих близкие зонные структуры и отличающихся от других представителей слоистых полупроводников группы A^3B^6 чрезвычайной близостью энергий прямых и непрямых экситонных состояний и ширин соответствующих запрещенных зон.

В свете сказанного выше и представлялось важным исследование особенностей межэкситонных взаимодействий в монокристаллах твердых растворов $Ga_{1-x}In_xSe$.

Исследовались спектры спонтанного и стимулированного излучения специально не легированных монокристаллов.

В качестве источника возбуждения использовался азотный лазер с $h\nu_{\text{возб}} = 3.667$ эВ с длительностью импульса ~ 10 нс, частотой следования импульсов ~ 100 Гц, мощностью ~ 100 кВт. Луч света направлялся под небольшим углом к оси с кристаллов (т.е. почти перпендикулярно к поверхности слоев).

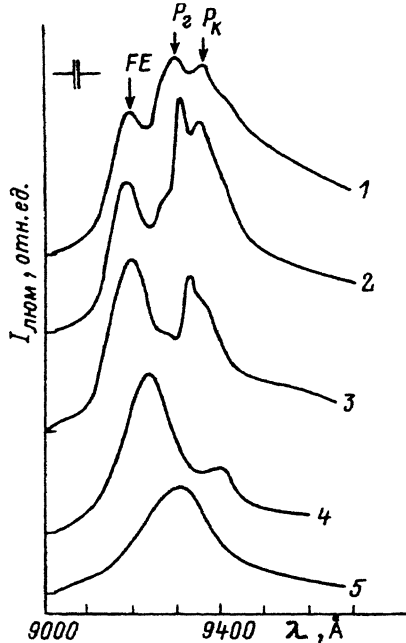


Рис. 1. Спектры спонтанной эмиссии кристаллов $\text{Ga}_{0.05}\text{In}_{0.95}\text{Se}$, зарегистрированные при уровне возбуждения $I = 3 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ и $T = 7$ (1), 20 (2), 40 (3), 70 (4), 110 К (5).

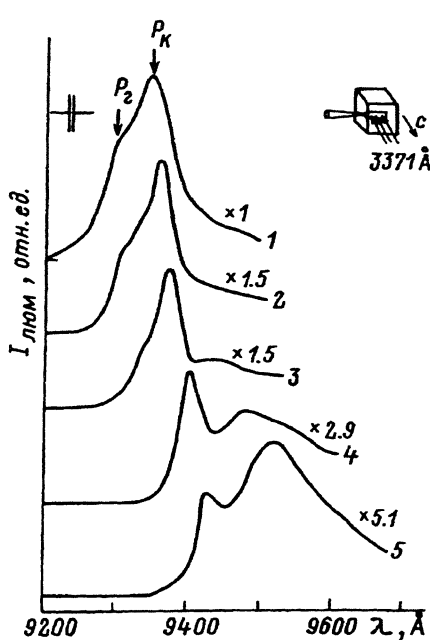


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения $\text{Ga}_{0.05}\text{In}_{0.95}\text{Se}$, зарегистрированные при уровне возбуждения $I = 3 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ и $T = 9$ (1), 35(2), 50 (3), 75 (4), 85 К (5).

При исследованиях спектра стимулированного излучения регистрировался свет, испущенный в направлении, перпендикулярном к оси c . Возбуждение при этом осуществлялось с помощью узкой полоски длиной ~ 3 мм, шириной менее ~ 150 мкм, получаемой цилиндрической линзой. Спектры спонтанной люминесценции регистрировались в обычной геометрии, т.е. при распространении излучения в направлении, близком к оси c .

Регистрация спектров осуществлялась с помощью стробоскопической системы фотоэлектрической регистрации и спектрометра ДФС-12 в интервале температур 5–100 К.

На рис. 1 (кривая 1) приведен спектр спонтанного излучения $\text{Ga}_{0.05}\text{In}_{0.95}\text{Se}$ при 8 К. Спектр характерен для высоких уровней возбуждения ($I = 3 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$) и состоит из линии свободного экситона FE ($h\nu = 1.348$ эВ) и более длинноволновых линий P_Γ ($h\nu = 1.334$ эВ) и P_κ ($h\nu = 1.325$ эВ). При низких уровнях возбуждения спектр состоит практически из линий FE . Затем, с ростом уровня возбуждения, в спектре появляются последовательно линии P_Γ и P_κ , причем интенсивность линии P_κ начинает расти быстрее интенсивности линии P_Γ .

С ростом температуры интенсивности линий FE , P_Γ и P_κ уменьшаются, и при $T > 90$ К в спектре остается лишь одна FE линия (рис. 1).

На рис. 2 приведены спектры стимулированного излучения кристаллов $\text{Ga}_{0.05}\text{In}_{0.95}\text{Se}$ при разных температурах и уровне возбуждения $I = 3 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$. При 9 К спектр состоит из линий P_Γ и P_κ . С ростом температуры интенсивность указанных линий уменьшается и они смещаются

в длинноволновую сторону. При $T > 50$ К линия P_r практически исчезает из спектра — в спектре остается линия P_k . С дальнейшим ростом температуры в спектре остается лишь одна широкая полоса, расположенная длинноволнее линии P_k .

Описанное выше поведение спектров спонтанного и стимулированного излучения кристаллов $Ga_{0.05}In_{0.95}Se$ аналогично поведению соответствующих спектров $InSe$ [3]. Как и в $InSe$, максимум линии P_r в $Ga_{0.05}In_{0.95}Se$ находится на ~ 14.5 мэВ ниже энергии прямого экситонного состояния, а ее интенсивность растет с интенсивностью возбуждения по квадратичному закону по отношению к интенсивности линии свободного экситона (FE). Простые оценки показывают, что положение линии P_r соответствует неупругому процессу взаимодействия прямых экситонов, в результате которого один из экситонов излучательно рекомбинирует, а другой распадается на свободные электрон и дырку.

Аналогичные оценки, проведенные с учетом энергии непрямых экситонов, показывают, что положение линии P_k соответствует процессу взаимодействия прямых экситонов с непрямыми, в результате которого излучает прямой экситон, а непрямой экситон распадается на свободные электрон и дырку.

Полученные результаты еще раз подтверждают близость зонных структур $InSe$ и $GaSe$, а также главную их особенность — наличие близких по энергии прямых и непрямых экситонных состояний.

Подчеркнем важное отличие спектров стимулированного излучения, зарегистрированных в кристаллах твердых растворов $Ga_{0.05}In_{0.95}Se$, от соответствующих спектров $InSe$. Как уже указывалось, в зависимости от степени совершенства кристаллов $InSe$ спектры спонтанной и стимулированной эмиссии могут содержать или не содержать линии излучения, обусловленные ЭДЖ. Описанные выше спектры излучения $Ga_{0.05}In_{0.95}Se$ характерны лишь для одного типа образцов $InSe$ — в них отсутствуют линии излучения, обусловленные ЭДЖ. Такие спектры регистрируются во многих образцах $InSe$, они опубликованы в многочисленных работах (см., например, [5]).

В спектрах рекомбинации, зарегистрированных в серии других образцов $InSe$, по-видимому, более совершенных [6], наблюдаются линии, обусловленные ЭДЖ. К примеру, в спектрах стимулированной эмиссии это приводит к возникновению новой линии эмиссии, расположенной существенно коротковолнее (~ 8 мэВ) линии излучения P_r [3].

Как показывают настоящие исследования, неупорядоченность структуры твердых растворов также не способствует протеканию процессов с образованием ЭДЖ.

Список литературы

- [1] Беленький Г.Л., Годжаев М.О. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 23. С. 831–838.
- [2] Беленький Г.Л., Годжаев М.О., Салаев Э.Ю., Алиев Е.Т. // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. № 11. С. 1886–1896.
- [3] Абдуллаев Г.Б., Годжаев М.О., Кахраманов Н.Б., Сулейманов Р.А. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 1. С. 75–82.
- [4] Электронно-дырочные капли в полупроводниках. / Под ред. Л.В.Келдыша и К.Д.Джеффриса. М.: Наука, 1988. 478 с.
- [5] Cingolani A., Ferrara M., Lugara M. // Sol. St. Comm. 1985. V. 55. N 11. P. 1007–1010.
- [6] Cingolani A., Ferrara M., Lugara M., Levy F. // Phys. Rev. 1982. V. B25. N 2. P. 1174–1178.