

УДК 621.315.592

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОМПЛЕКСОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНОМ $p$ -GaAs, СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИЕМ

Журавлев К. С., Терехов А. С., Якушева Н. А.

Изучены спектроскопические параметры обусловленной комплексобразованием полосы ФЛ в сильно легированном эпитаксиальном GaAs<Ge> в диапазоне концентраций  $p=4.2 \times 10^{17} \div 3.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Установлено, что ширина полосы с учетом точности определения во всем диапазоне концентраций остается неизменной. Положение максимума неизменно в диапазоне легирования  $p=4.2 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и смещается в низкоэнергетичную сторону при больших уровнях легирования. Интенсивность этой полосы квадратично зависит от уровня легирования, что свидетельствует, вероятно, о том, что эта полоса связана с комплексом либо  $\text{Ge}_{\text{As}}-\text{Ge}_{\text{Ga}}$ , либо  $\text{Ge}_{\text{As}}-V_{\text{As}}$ .

Спектры низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) нелегированного арсенида галлия наряду с краевыми линиями содержат полосы, обусловленные излучательными переходами с участием уровней комплексов, состоящих из точечных дефектов решетки и атомов фоновых примесей [1]. При легировании материала примесями с мелкими уровнями возрастает интенсивность излучательных переходов примесь—зона, а относительная интенсивность полос комплексов уменьшается. Однако при сильном легировании ( $N_i \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) в спектрах ФЛ относительная интенсивность полос комплексов вновь возрастает. Спектроскопические параметры этих полос отличаются от наблюдаемых в нелегированных материалах, что свидетельствует об изменении их природы. Комплексобразование в сильно легированном  $n$ -GaAs изучено достаточно подробно [2, 3]. В сильно легированном эпитаксиальном  $p$ -GaAs влияние комплексобразования на ФЛ изучено слабо. В работах [4-6] сообщалось лишь о появлении интенсивной полосы в спектрах ФЛ  $p$ -GaAs <Ge> с концентрацией дырок  $p \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В данной работе изучены форма и концентрационные зависимости спектроскопических параметров этой полосы в диапазоне  $p=4.2 \cdot 10^{17} \div 3.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Установлено, что интенсивность полосы квадратично зависит от уровня легирования.

Исследуемые слои выращивались методом жидкофазной эпитаксии из расплава галлия на подложках полуизолирующего GaAs ориентации (100). Раствор-расплав охлаждался от 800 до 745 °C со скоростью 1.1 град/мин. Концентрация свободных носителей определялась из измерений коэффициента Холла методом Ван-дер-Пау. Толщины выращенных слоев лежали в интервале 10-15 мкм.

Стационарная ФЛ возбуждалась излучением аргонового лазера с длиной волны  $\lambda=5145 \text{ \AA}$ . Плотность возбуждения была постоянной и равной 100 Вт/см<sup>2</sup>. Рекомбинационное излучение анализировалось монохроматором ДФС-24 с решетками 600 штр/мм и регистрировалось охлаждаемым фотоумножителем типа ФЭУ-83, работающем в режиме счета фотонов. Управление разверткой монохроматора по длинам волн, измерение интенсивности ФЛ с заданной точностью, учет флуктуаций интенсивности лазера, нормировка спектров на пропускание оптической системы и спектральную чувствительность ФЭУ осуществлялись на ЭВМ «Электроника-60». Все измерения проводились при температуре жидкого азота.

На рис. 1 приведены спектры ФЛ образцов с различным уровнем легирования. Спектры содержат три основные полосы *A*, *B* и *C*. Линии *A* и *B* обусловлены излучательными переходами зона—зона и зона—акцептор и хорошо изучены в литературе [4, 7]. Из рис. 1 видно, что полоса *C*, наблюдавшаяся авторами [4, 5] при  $p \geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , может быть выделена в спектре ФЛ начиная с концентраций легирующей примеси порядка  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Для определения концентрационной зависимости спектроскопических параметров полос спектры ФЛ были представлены в виде двух элементарных полос. Коротковолновое крыло полосы *B* задавалось в виде  $F(\hbar\omega) = A \exp(-\hbar\omega/kT)$ , где  $T$  — температура решетки, а длинноволновое — в виде  $F(\hbar\omega) = B \times \exp(-\gamma\hbar\omega)$ , где  $\gamma$  — параметр, зависящий от уровня легирования. Такое опи-

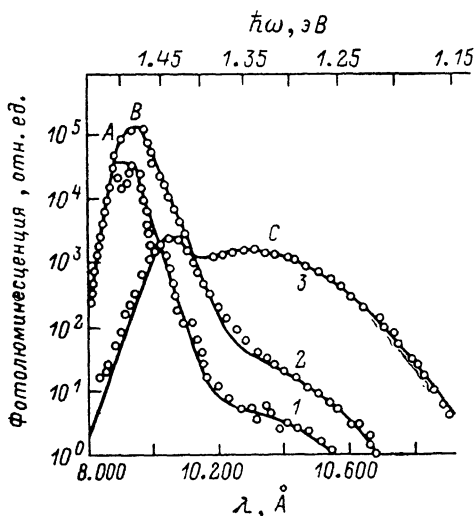


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные спектры ФЛ.

Точки — экспериментальные значения, сплошные линии — расчеты:  $p \cdot 10^{18}, \text{ см}^{-3}$ : 1 — 0.42, 2 — 4.5, 3 — 35.  $T = 77 \text{ К}$ .

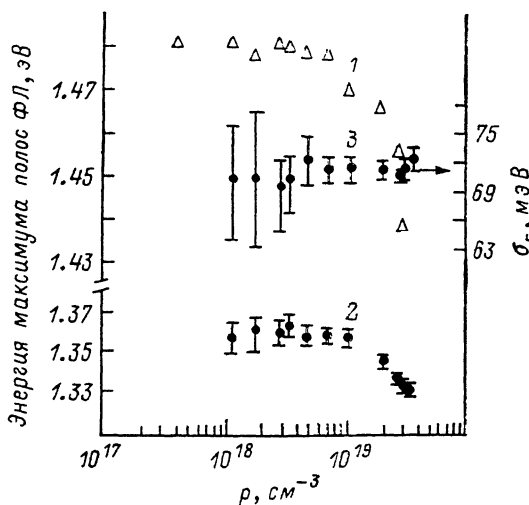


Рис. 2. Зависимость параметров полос ФЛ от концентрации дырок.

1 — энергия максимума полосы *B*, 2 — энергия максимума полосы *C*, 3 — ширина полосы *C*.

сание не учитывает полосу *A*, наблюдаемую лишь при самых малых концентрациях, и фоновые повторения полосы *B*, которые наблюдаются в спектрах образцов с уровнем легирования  $p < 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Форма полосы *C* задавалась в виде гауссовой кривой  $G(\hbar\omega) = C \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\hbar\omega - \hbar\omega_r}{\sigma_r}\right)^2\right] \sqrt{2} \pi \sigma_r$ , характерной для излучательных электронных переходов на центрах, сильно связанных с решеткой [8]. Из рис. 1 видно, что при всех уровнях легирования измеренные спектры хорошо описываются суммой двух элементарных полос выбранного вида.

Параметры полосы *C* были получены с использованием программы оптимизации на основе метода  $\chi^2$ -квадрат. На рис. 2 приведены значения параметров, при которых величина  $\chi^2$  минимальна, а также показаны области значений параметров, при которых  $\chi^2$  увеличивается на 10 % от своего минимального значения. Из рис. 2 видно, что энергетическое положение полосы *C* остается неизменным в диапазоне легирования  $p = 4.2 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и смещается в низкоэнергетичную сторону при больших уровнях легирования. С учетом точности определения параметр  $\sigma_r$  во всем диапазоне концентраций остается неизменным. На основе этих данных можно сделать вывод, что в диапазоне легирования  $p = 1 \cdot 10^{18} \div 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  параметры центра, ответственного за полосу *C*, не изменяются. Для выяснения причины смещения энергетического положения полосы при  $p > 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  требуются дополнительные исследования, однако мы полагаем, что наблюдаемый сдвиг в значительной мере обусловлен изменением положений краев зон при сильном легировании.

Известно, что центры, сильно связанные с решеткой, могут одновременно являться центрами излучательной и безызлучательной рекомбинации [8]. Для выявления вклада центра, ответственного за полосу *C*, в безызлучательную ре-

комбинацию мы построили концентрационные зависимости относительной интегральной интенсивности полосы  $S = I_C / (I_C + I_B)$ , а также суммы полос  $B$  и  $C$   $I_2 = I_C + I_B$ , отражающей внутренний квантовый выход люминесценции. Эти зависимости показаны на рис. 3. Видно, что в диапазоне легирования  $p = 1 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  величина  $I_2$  от концентрации не зависит, но уменьшается на порядок при увеличении легирования до  $p = 3.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Величина  $S$  при этом квадратично возрастает с увеличением легирования. Вполне возможно, что при высоких уровнях легирования  $p > 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  концентрация центров, ответственных за полосу  $C$ , становится достаточно большой и безызлучательная рекомбинация через этот центр начинает определять квантовый выход ФЛ. Необходимо, однако, отметить, что при  $p > 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  наблюдаются изменения энергетического положения полос  $B$  и  $C$ . Возможно, что все эти изменения не обусловлены простым повышением уровня легирования, а вызваны изменением характера встраивания германия в решетку GaAs, что и приводит к изменению электронного спектра сильно легированного GaAs, введению дополнительных центров безызлучательной рекомбинации. Основанием для этого предположения является то, что, как и в [9, 10], в исследованных образцах при  $p > 1 \cdot 10^{19}$  наблюдается значительное отклонение от линейного закона в зависимости концентрации дырок от концентрации германия в жидкой фазе.

Имеющихся данных недостаточно для определения состава центра, ответственного за полосу  $C$ . Квадратичная зависимость относительной интенсивности полосы  $C$  от уровня легирования в некоторых предположениях [11] может указывать на то, что этот центр есть пара атомов Ge, замещающих соседние атомы Ga и As. Возможно также, что этот центр является комплексом  $(\text{Ge}_{\text{As}} - \text{V}_{\text{As}})$ , аналогичным предложенному в [12] для GaAs  $\langle \text{Zn} \rangle$ . Квадратичная зависимость в этом случае может быть связана с тем, что повышение уровня легирования приводит к пропорциональному росту концентрации вакансий мышьяка [13].

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Lum W. Y., Clawson A. K., Elder D. I., Wieder H. H. — J. Appl. Phys., 1978, v. 49, N 6, p. 3333—3336.
- [2] Бублик В. Т., Мильевский М. Г., Освенский В. Б. — Изв. вузов СССР, 1980, № 1, с. 7—22.
- [3] Guislain H. J., De Wolf L., Claus P. — J. Electron. Mater., 1977, v. 7, N 6, p. 541—567.
- [4] Rosztochy F. E., Ermanis F., Hayashi I., Schwartz B. — J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 1, p. 264—270.
- [5] Kressel H., Ettenberg M. — Appl. Phys. Lett., 1973, v. 223, N 9, p. 511—513.
- [6] Ai-zhen Li, Milnes A. G., Chen Z. Y., Shao Y. F., Wang S. B. — J. Vac. Sci. Techn. B, 1985, v. 3, N 2, p. 629—633.
- [7] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Морозов Е. П., Третьяков Д. Н. — ФТП, 1969, т. 3, в. 5, с. 706—711.
- [8] Klick C. C., Schulman J. H. — In: Sol. St. Phys., v. 5 / Ed. by F. Seitz, D. Turnbull. N. Y., 1957, p. 97—173.
- [9] Ketchow D. R. — J. Electrochem. Soc., 1974, v. 121, N 9, p. 1237—1239.
- [10] Rosztochy F. E., Wolfstirn K. B. — J. Appl. Phys., 1971, v. 42, N 1, p. 426—429.
- [11] Кукк П. Л. — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1980, т. 16, в. 9, с. 1509—1513.
- [12] Hwang C. J. — Phys. Rev., 1969, v. 180, N 3, p. 827—832.
- [13] Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов. М., 1969. 655 с.

Институт физики полупроводников  
СО АН СССР Новосибирск

Получена 29.05.1987  
Принята к печати 22.07.1987

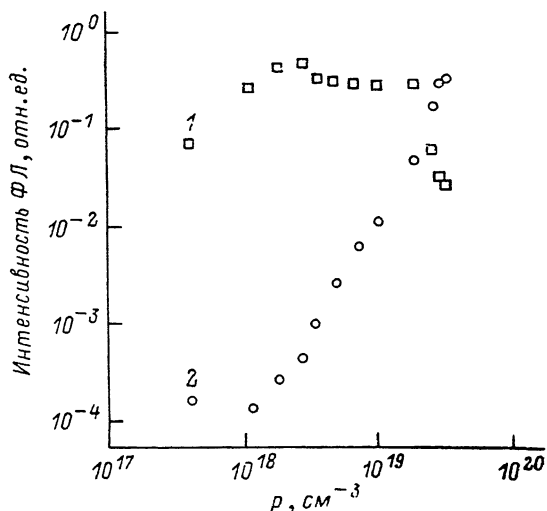


Рис. 3. Зависимость интенсивности ФЛ от концентрации германия.

1 — сумма интенсивностей полос  $B$  и  $C$ , 2 — относительная интенсивность полосы  $C$ .