УДК 621.315

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ GaP : N ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Н. Р. Нуртдинов, А. В. Винников

(кафедра физики полупроводников)

При больших уровнях возбуждения в GaP, как и в других полупроводниках [1], возможно образование капель электронно-дырочной плазмы высокой плотности (ЭДК) [2]. Изоэлектронная примесь N при этом может выступать в качестве третьего тела в законе сохранения квазиимпульса и стимулировать появление бесфононной линии рекомбинации в ЭДК [3] либо обусловливать возникновение нового типа дырочной плазмы (*HP*), более стабильной при больших концентрациях N [4]. Относительная роль того или иного механизма зависит от уровня возбуждения и от концентрации примесей, и этот вопрос является недостаточно изученным в литературе.

Исследовались *n*- и *p*-слои GaP:N, выращенные методом жидкофазной эпитаксии. Концентрация N изменялась в пределах $n_N = (1—4) \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Концентрация доноров S и Si в *n*-слоях была $(1—4) \times \times 10^{17}$ см$^{-3}$; концентрация акцепторов Zn в *p*-слоях была 10^{17} и 10^{18} см$^{-3}$. Для получения больших уровней возбуждения применялся импульсный азотный лазер ЛГИ-21, который обеспечивал максимальную поверхностную плотность возбуждения $W \approx 10^5$ Вт/см^2. Для получения малых уровней возбуждения применялся непрерывный гелий-кадмиевый лазер ЛПМ-11 ($W \approx 10$ Вт/см^2). Исследования проводились в интервале температур $T = 30—300$ К. Максимальная ошибка определения интенсивности люминесценции была $\pm 2\%$, плотности возбуждения $\pm 30\%$, концентрации примесей $(+50, —30)\%$, температуры ± 1 К.

При низких температурах и малых уровнях возбуждения в спектрах люминесценции образцов *n*- и *p*-типа с $n_{Zn} = 10^{17}$ см$^{-3}$ наблюдались хорошо известные линии рекомбинации экситонов, связанных на одиночных (*A*-линия) и парных (NN_i-линии) атомах азота (рис. 1, *а*). При $W \geqslant W_{крит} \approx 4 \cdot 10^4$ Вт/см^2 в спектрах появлялась широкая люминесцентная полоса, расположенная ниже по энергии относительно *A*-линии на величину $\Delta\hbar\omega \approx 11 \pm 1$ МэВ (*HP* на рис. 1, *б*). Аналогичное поведение спектров фотолюминесценции GaP:N наблюдалось в работах [3, 5, 6] при $T \leqslant 80$ К. В спектрах образцов *p*-типа с $n_{Zn} \geqslant 10^{18}$ см$^{-3}$ нами наблюдались не описанные в литературе полосы U^* с $\Delta\hbar\omega = 14 \pm \pm 1$ МэВ (при $W < W_{крит}$) и HP^* с $\Delta\hbar\omega = 18 \pm 1$ МэВ (при $W \geqslant W_{крит}$, см. рис. 1, *б*); обозначения полос — по аналогии с принятыми в работах [3, 4, 7]. Излучательное время полос *HP*, HP^*, U^* и линии *A* было равно ≈ 18, 10, 22 и 30 нс (при $T = 60$ К).

При более высоких температурах спектры сдвигались в низкоэнергетичную сторону согласно изменению ширины запрещенной зоны и сильно уширялись, однако критический характер поведения для полос HP^* при $n_N \leqslant 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ и *HP* надежно прослеживался вплоть до 200 К (рис. 2). Для образцов *p*-типа с $n_N > 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ широкая люминесцентная полоса (разделить HP^* и U^* в этом случае было невозможно) наблюдалась вплоть до малых уровней возбуждения (см. рис. 2, *а*).

Возможные механизмы рекомбинации в GaP:N при больших уровнях возбуждения обсуждались рядом авторов (см., например, работы [3, 4, 6] и обзор [5]). Отсутствие критической температурной зависимости для полосы *HP* свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне концентраций азота полоса *HP* не может быть обусловлена механизмом бесфононной рекомбинации в ЭДК, первоначально предложенным в [3] ($T_{крит}$ для ЭДК в GaP не превышает 70 К [2]). Таким образом, она обусловлена механизмом рекомбинации в дырочной плазме, т. е. рекомбинацией электронов, локализованных на изоэлектрон-

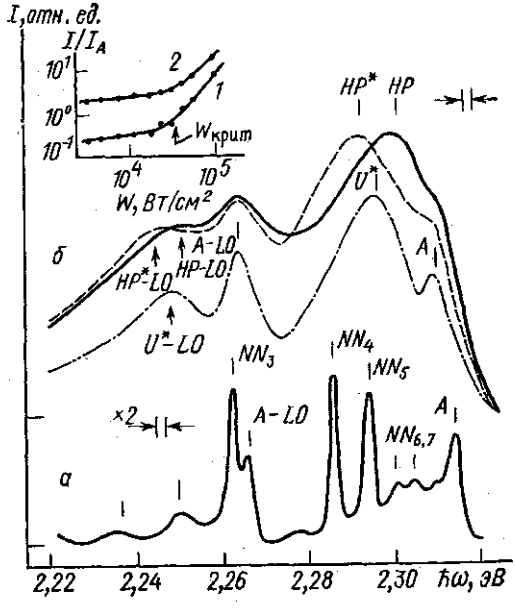

Рис. 1. Спектры фотолюминесценции GaP:N при 30 К и $W \approx 10$ Вт/см^2 (*а*) и при 60 К и $W \approx 10^5$ Вт/см^2 (*б*). Сплошная линия — образец *n*-типа; штриховая линия — образец *p*-типа. Штрих-пунктирная линия — спектр образца p-типа при $W \approx 5 \times 10^3$ Вт/см^2. На вставке — зависимость отношения интенсивности *HP*-полосы (*1*) и *HP**-полосы (*2*) к интенсивности А-линии от плотности возбуждения *W*. Для $W \geqslant 4 \times 10^4$ Вт/см^2 I_A пересчитана по I_{A-LO}

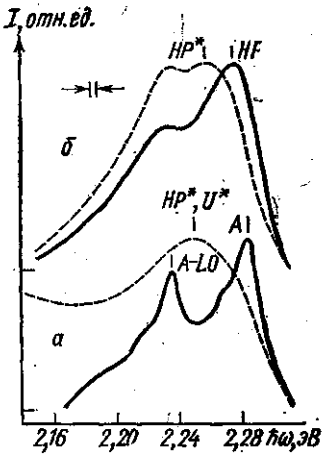

Рис. 2. Спектры фотолюминесценции GaP:N при $W \approx 10$ Вт/см^2 (*а*) и $W \approx 10^5$ Вт/см^2 (*б*). Сплошная линия — образец *n*-типа; штриховая линия — образец *p*-типа. $T = 200$ К

ных центрах (N и NNi), с делокализованными дырками (см. [5, 6]). Полученные данные согласуются с расчетами [4], согласно которым образование дырочной плазмы при $n_N \geqslant 10^{18}$ см$^{-3}$ становится энергетически более выгодным, чем образование ЭДК.

Положение максимума полосы *U** сдвинуто относительно наблюдавшейся в работе [6] при $T \leqslant 20$ К полосы *U*, которая обусловлена рекомбинацией экситонов, связанных на комплексах азот—нейтральный акцептор Zn (N—Zn^0) на 6—10 МэВ; эта величина соответствует энергетическому смещению линий NN$_i$-пар (i=7—10) относительно *A*-линии. Поскольку в этой области концентраций азота велика вероятность образования NN-пар ($n_{NN} \sim (n_N)^2$) [5], то можно предположить, что полоса *U** обусловлена рекомбинацией на комплексах NN$_i$—Zn^0 (i=7—10).

Характер поведения и форма полосы *HP** аналогичны данным для полосы *HP*. Это свидетельствует о том, что механизмы рекомбинации,

обусловливающие эти полосы, аналогичны. Известно, что Zn является эффективным центром безызлучательной оже-рекомбинации и уменьшает время жизни неравновесных носителей [5]. Поэтому приблизительное совпадение $W_{крит}$ для этих полос дает основание предположить, что акцептор Zn, будучи источником добавочных свободных дырок, дополнительно стабилизирует дырочную плазму. Более низкоэнергетичное положение полосы *HP* также свидетельствует в пользу этого предположения.

Таким образом, в работе показано, что в исследованном диапазоне концентраций азота полоса *HP* обусловлена рекомбинацией в дырочной плазме. Показано также, что спектральное положение и характер поведения полос U^* и *HP* в зависимости от уровня возбуждения и температуры согласуются с предложенными для их объяснения механизмами рекомбинации экситонов, связанных на комплексах NN_i—Zn^0, и рекомбинации в дырочной плазме. Вопрос об идентификации механизмов рекомбинации в GaP:N, Zn при малых уровнях возбуждения и $T \geqslant 200$ К требует дальнейших исследований.

Авторы глубоко благодарны А. Э. Юновичу за предложенную тему, Э. Ю. Бариновой и М. В. Чукичеву за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Pokrovskii Ya. Condensation of non-equilibrium charge carriers in semiconductors.— Phys. St. Sol. (a), 1972, **11**, N 2, p. 385—410. [2] Hulin D., Combescot M., Bontemps N., Mysyrowicz A. Electron-hole liquid in GaP.— Phys. Lett., 1977, **61A**, N 5, p. 349—351. [3] Schwabe R., Thuselt F., Bindemann R., Seifert W., Jacobs K. Radiative recombination from electron-hole drops in N-doped GaP.— Phys. Lett., 1977, **64A**, N 2, p. 226—229. [4] Combescot M., Benoit à la Guillaume C. Two critical points for an electron-hole system.— Phys. Rev. Lett., 1980, **44**, N 3, p. 182—185. [5] Yunovich A. E. Strahlende Rekombination und optische Eigenschaften von GaP. — Fortschritte der Physik, 1975, **23**, N 6, p. 317—396. [6] Pyshkin S. L., Zifudin L. Z. — J. Lumin., 1974, **9**, p. 302. [7] Street R. A., Wiesner P. J. Optical investigation of the undulation spectrum of GaP:N:Zn. — Phys. Rev. B, 1976, **14**, N 2, p. 632—643.

Поступила в редакцию
10.03.81

УДК 530.18;534.222.2

КАНОНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОПИСАНИИ ВОЛНОВЫХ ДВИЖЕНИЙ В СРЕДАХ СО СВОБОДНЫМИ ГРАНИЦАМИ

В. И. Павлов, Ю. Слабейциус (ЧССР)

(кафедра акустики)

Многие прикладные задачи физики, не говоря уже о проблемах, связанных с взаимодействием океана и атмосферы, требуют рассмотрения систем гидродинамического типа, ограниченных подвижными поверхностями. Имея в виду использование гамильтоновских методов [1, 2] для исследования волновых процессов в таких средах, сформулируем один из возможных подходов, позволяющих включить системы со свободными границами в рамки подобного описания. Цель настоящего сообщения — обобщить положения, сформулированные в [3] и развитые затем в [4, 5].

Если среда допускает разбиение на области G_m с резкими границами η_m (рисунок), внутри которых свойства среды меняются достаточ-