

Фотолюминесценция электронно-дырочной плазмы в полуизолирующем нелегированном GaAs

© В.Ф. Коваленко[¶], С.В. Шутов

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины, Херсонский отдел, 73008 Херсон, Украина

(Получена 14 августа 2003 г. Принята к печати 20 мая 2004 г.)

Исследована зависимость фотолюминесценции электронно-дырочной плазмы в полуизолирующем нелегированном GaAs от концентрации фоновой примеси углерода N_C ($3 \cdot 10^{15} \leq N_C \leq 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при 77 К. Установлено, что плотность электронно-дырочной плазмы, составляющая $n_{e-h} \approx 1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при интенсивности возбуждения $6 \cdot 10^{22} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$ в кристаллах с минимальной концентрацией примеси, существенно уменьшается при увеличении N_C в исследованном интервале. Снижение плотности электронно-дырочной плазмы с ростом N_C связывается с влиянием флуктуаций концентрации N_C , обуславливающих неоднородное распределение взаимодействующих носителей заряда и локализацию дырок в „хвостах“ плотности состояний валентной зоны.

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) электронно-дырочной плазмы (ЭДП) и электронно-дырочных капель (ЭДК) соответственно в прямозонных и непрямозонных полупроводниках проводились, как правило, на высокочистых материалах, использование которых обеспечивает выполнение условия $N < n_{e-h}, n_{ex}$ (N, n_{e-h}, n_{ex} — концентрации примеси, электронно-дырочных пар, экситонов соответственно) при высоких уровнях возбуждения и, как следствие этого, проявление коллективных взаимодействий неравновесных носителей заряда [1–6].

Очевидно, что увеличение N должно усиливать экранирующее влияние атомов примеси на носители заряда и ослаблять их взаимодействие. Представляется, что степень такого влияния может зависеть от электрофизических параметров материала, степени компенсации, характера распределения примесного потенциала. Однако возможное воздействие указанных факторов на ЭДП в прямозонных полупроводниках практически не исследовано.

В настоящем сообщении рассмотрена зависимость фотолюминесценции ЭДП в полуизолирующем нелегированном (ПИН) GaAs, содержащем флуктуации примесного потенциала, от концентрации фоновой примеси углерода N_C . Электрофизические характеристики исследуемых образцов, методика измерения спектров ФЛ приведены в [7]. Уровень возбуждения J изменялся в пределах $3 \cdot 10^{21} - 6 \cdot 10^{22} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$ за счет регулирования рабочего тока Ag-лазера.

Ранее было показано [7], что краевая полоса излучения в спектрах ФЛ кристаллов ПИН GaAs, содержащих фоновый углерод в концентрации N_C , при низких уровнях возбуждения ($J \leq 3 \cdot 10^{21} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$) формируется межзонными переходами взаимодействующих носителей заряда при $N_C \leq 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а при более высоких значениях N_C — рекомбинацией свободных электронов с дырками, локализованными в „хвостах“ плотности состояний валентной зоны, обусловленных флуктуациями концентрации легирующей примеси.

При увеличении интенсивности возбуждения ($J > 3 \cdot 10^{21} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$) происходила перестройка спектра краевой ФЛ, характерная для излучательной рекомбинации электронно-дырочной плазмы: максимум полосы (энергия максимума $h\nu = h\nu_m$) смещался в длинноволновую область, происходило расширение и изменение формы полосы. При этом коротковолновый спад становился более пологим (рис. 1), что свидетельствует о рекомбинации горячих носителей заряда, температура которых при максимальной интенсивности возбуждения, оцененная по наклону коротковолнового спада, увеличилась в интервале $T = 87 - 96 \text{ К}$ при возрастании N_C в исследованном интервале $3 \cdot 10^{15} \leq N_C \leq 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Спектр излучения некоторых кристаллов при самых высоких уровнях возбуждения проявлял пиковую структуру (рис. 1), обусловленную, очевидно, возникновением стимулированного излучения. Наиболее существенная перестройка спектра происходила в кристаллах с наименьшими значениями N_C . С увеличением концентрации углерода она исчезала при $N_C \approx 2.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, как это следует из экстраполяции зависимостей от N_C энергии максимума, $h\nu_m(N_C)$, и ширины полосы, $W(N_C)$, при различных уровнях возбуждения (рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость плотности ЭДП n_{e-h} при $J = 6 \cdot 10^{22} \text{ квант/см}^2 \cdot \text{с}$ от концентрации углерода, оцененной в приближении эффективного потенциала по формуле [4]

$$E'_g = E_g - \frac{3e^2}{\pi\epsilon} (3\pi^2 n_{e-h})^{1/3},$$

где E'_g — ширина запрещенной зоны, „сокращенной“ вследствие коллективного электронно-дырочного взаимодействия, E_g — ширина „невозмущенной“ запрещенной зоны, $\epsilon = 12$ — диэлектрическая проницаемость GaAs, e — заряд электрона. При оценке полагали $E'_g = h\nu_m$, значение E_g при $N_C \geq 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ уменьшали на глубину уровня протекания электронов и дырок $\gamma' = (2/3)\gamma$ (γ — глубина потенциальных ям, образованных флуктуациями концентрации углерода).

[¶] Факс: (0552)515457

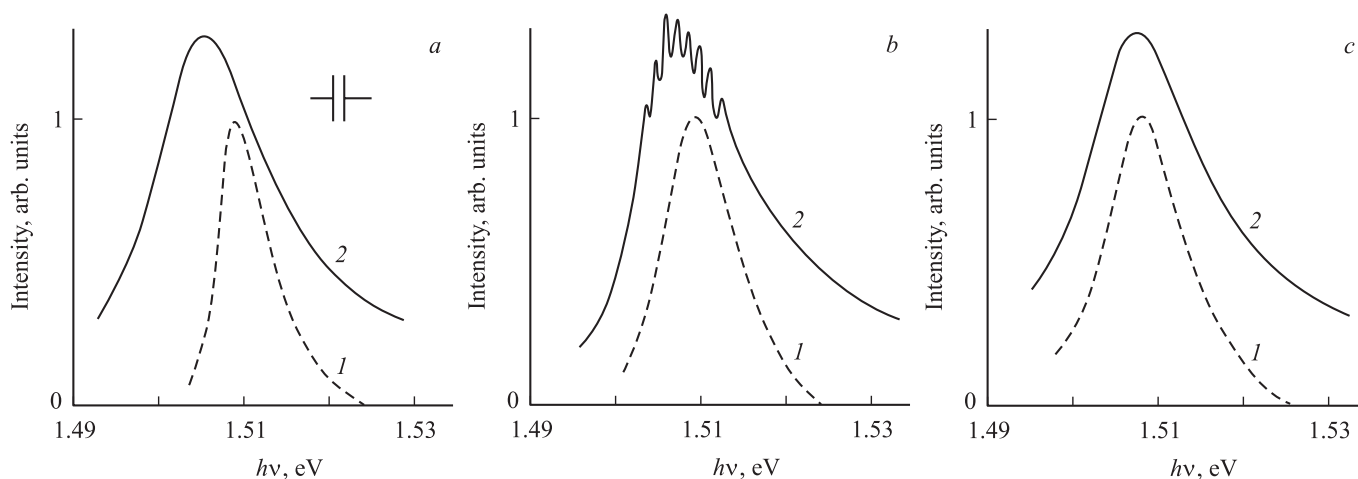


Рис. 1. Зависимость формы спектра краевой ФЛ кристаллов с различными концентрациями углерода N_C от уровня возбуждения. $T = 77$ К. J , квант/см² · с: 1 — $3 \cdot 10^{21}$, 2 — $6 \cdot 10^{22}$. N_C , см⁻³: а — $3.5 \cdot 10^{15}$; б — $9 \cdot 10^{15}$; с — $2.1 \cdot 10^{16}$. Спектры нормированы на 1 и смещены по вертикальной оси произвольным образом.

Приведенная на рис. 3 зависимость $n_{e-h}(N_C)$ показывает, как и предполагалось, уменьшение плотности ЭДП с ростом N_C , причем более значительное по сравнению с аналогичным изменением плотности ЭДК в Ge [8]. Основным фактором, обуславливающим существенное снижение ЭДП при увеличении N_C , является, по нашему мнению, наличие флуктуаций концентрации легирующей примеси, приводящих к неоднородному

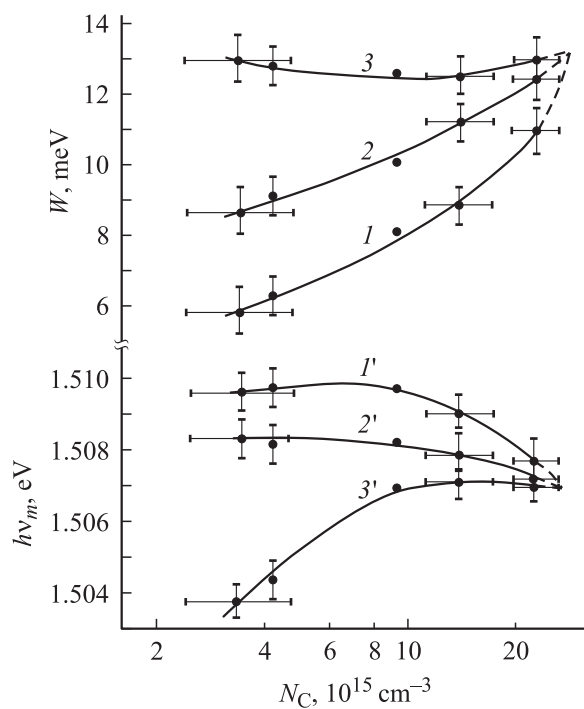


Рис. 2. Зависимость ширины W (1–3) и энергии максимума $h\nu_m$ (1'–3') спектра краевой ФЛ от содержания углерода при различных уровнях возбуждения. $T = 77$ К. J , квант/см² · с: 1, 1' — $3 \cdot 10^{21}$; 2, 2' — $2 \cdot 10^{22}$; 3, 3' — $6 \cdot 10^{22}$.

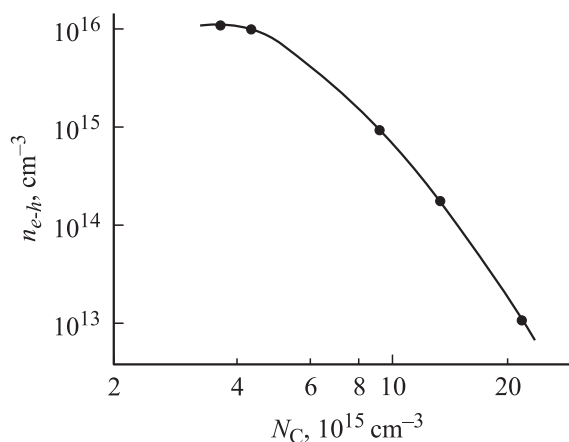


Рис. 3. Зависимость плотности ЭДП от концентрации углерода при $J = 6 \cdot 10^{22}$ квант/см² · с. $T = 77$ К.

распределению взаимодействующих носителей заряда. Локализация дырок в „хвостах“ плотности состояний валентной зоны при $N_C \geq 1.4 \cdot 10^{16}$ см⁻³, происходящая за времена, меньшие времени жизни неравновесных носителей заряда (по нашим оценкам при максимальной интенсивности возбуждения $\tau \leq 1.3 \cdot 10^{-11}$ с, что соответствует приводимым ранее значениям τ в ПИН GaAs [9]), уменьшает долю носителей заряда, участвующих в образовании электронно-дырочной плазмы. Последнее обстоятельство в еще большей степени снижает ее плотность.

Список литературы

- [1] В.Б. Стопачинский. ЖЭТФ, **72** (2), 592 (1977).
- [2] В.С. Багаев, Л.И. Падучих, Г.С. Сахоненко. В кн.: *Экситоны в полупроводниках* (М., Наука, 1971) с. 54.

- [3] В.Г. Лысенко, В.И. Ревенко, Т.Г. Тратас, В.Б. Тимофеев. ЖЭТФ, **68** (1), 335 (1975).
- [4] T. Moriya, T. Kushida. J. Phys. Soc. Japan, **43** (5), 1646 (1977).
- [5] М.Н. Винославский, А.В. Кравченко. ФТП, **35** (4), 390 (2001).
- [6] В.А. Ващенко, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, В.Ф. Синкевич. ФТП, **23** (8), 1378 (1989).
- [7] В.Ф. Коваленко, М.Б. Литвинова, С.В. Шутов. ФТП, **36** (2), 174 (2002).
- [8] D.L. Smith. Sol. St. Commun., **18**, 637 (1976).
- [9] Н.М. Литовченко, Л.Г. Шепель. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., вып. 29, 108 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

The electron-hole plasma photoluminescence in semi-insulating undoped GaAs

V.F. Kovalenko, S.V. Shutov

Institute of Semiconductor Physics
National Academy of Sciences of Ukraine,
Kherson Division,
73008 Kherson, Ukraine

Abstract The electron-hole plasma photoluminescence dependence on the carbon content N_C ($3 \cdot 10^{15} \leq N_C \leq 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) in undoped semi-insulating GaAs at 77 K are studied. It is established, that the hardness of electron-hole plasma ($n_{e-h} \approx 1.1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at $6 \cdot 10^{22} \text{ quantum/cm}^2 \text{ s}$) in the crystals with the minimal admixture strength essentially decreases in the studied N_C interval with the growth of N_C .