

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ДЫРОК В n -GaAs, ВЫСВОБОДИВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЖЕ-РАСПАДА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Акимов А. В., Жилиев Ю. В., Криволапчук В. В.,
Полетаев Н. К., Шофман В. Г.

В n -GaAs исследована медленная (микросекундная) компонента кинетики фотолюминесценции линии, отвечающей рекомбинации электрона на мелком доноре и дырки валентной зоны D^0 , h . Показано, что кинетика обусловлена выбросом дырок в валентную зону из локализованных состояний. Выброс осуществляется в результате оже-рекомбинации с участием двух дырок, захваченных на глубокий центр.

В предыдущей работе [1] сообщалось о наблюдении аномально длительной (10^{-6} с) компоненты затухания фотолюминесценции (ФЛ), отвечающей рекомбинации свободных дырок в n -GaAs. Эксперименты [1] с тепловыми импульсами показали, что затухание обусловлено безактивационным высвобождением дырок из локализованных состояний. В настоящей работе представлены результаты новых экспериментов и предложена модель, описывающая механизм возникновения долговременного затухания ФЛ.

Нами исследовались образцы n -GaAs с $N_D - N_A = 10^{14} - 10^{16}$ см $^{-3}$ и различной степенью компенсации по мелким примесям. Толщина эпитаксиального слоя варьировалась от 2 до 200 мкм. Слои выращивались на подложках с ориентацией (100) различными методами: жидкофазной эпитаксией, газофазной эпитаксией в хлоридной системе, МОС гидридным способом. Люминесценция возбуждалась импульсным YAG-лазером ($\lambda = 530$ нм, $\tau_x = 10^{-7}$ с) либо полупроводниковым лазером ($\lambda = 799$ нм, $\tau_x = 10^{-7}$ с). Исследования проводились в диапазоне температур 2—25 К. Измерения затухания линий ФЛ проводились на спектрометре ДФС-54 методом времякоррелированного счета фотонов с использованием многоканального анализатора АИ-1024, связанного с микроЭВМ «Электроника-60».

Типичные спектры ФЛ (см., например, [2]) эпитаксиальных слоев n -GaAs при слабом ($P = 10^{-3}$ Вт/см 2) возбуждении показаны на рис. 1, а, б. В образцах с $N_D - N_A < 10^{15}$ см $^{-3}$ и малым уровнем компенсации в спектре ФЛ (рис. 1, а) присутствуют линии свободных экситонов (поляритонов) верхней UPB ($E = 1.5153$ эВ) и нижней LPB ($E = 1.5149$ эВ) поляритонных ветвей, экситона, связанного на нейтральном доноре, (D^0 , X) (1.5140 эВ), перехода (D^0 , h) (1.5133 эВ), отвечающего рекомбинации электрона на нейтральном доноре и свободной дырки в валентной зоне. При увеличении степени компенсации в спектре появляется линия, отвечающая экситону, связанному на нейтральном акцепторе (A^0 , X) ($E = 1.5125$ эВ) (рис. 1, б).

Кривые затухания ФЛ линии (D^0 , X) $I(t)$ образцов, соответствующие спектры которых приведены выше, показаны на рис. 2. Видно, что наблюдается быстрый спад, за которым следует медленный хвост, относительная интенсивность которого зависит от образца и уменьшается по мере увеличения степени компенсации по мелким примесям. Наблюдаемое время быстрого спада отвечает времени жизни фотовозбужденных носителей в n -GaAs при гелиевых температурах $\tau_0 \leq 10^{-8}$ с [3]. Время τ затухания хвоста, определяемое по на-

клону $I(t)$ при $t > 2$ мкс, составляет величину $6 \cdot 10^{-6}$ с и практически не зависит от конкретного образца.

Спектры люминесценции, измеренные с временной задержкой после окончания импульса возбуждения $t_{\text{зад}} = 8$ мкс во временном окне $\Delta t = 1$ мкс при $T = 2$ К, показаны на рис. 1, *в*. Видно, что в спектрах (рис. 1, *в*) отсутствуют линии свободного экситона и экситона, связанного на нейтральном акцепторе. Вид спектров практически не изменяется при изменении $t_{\text{зад}}$ от 1 до 10 мкс.

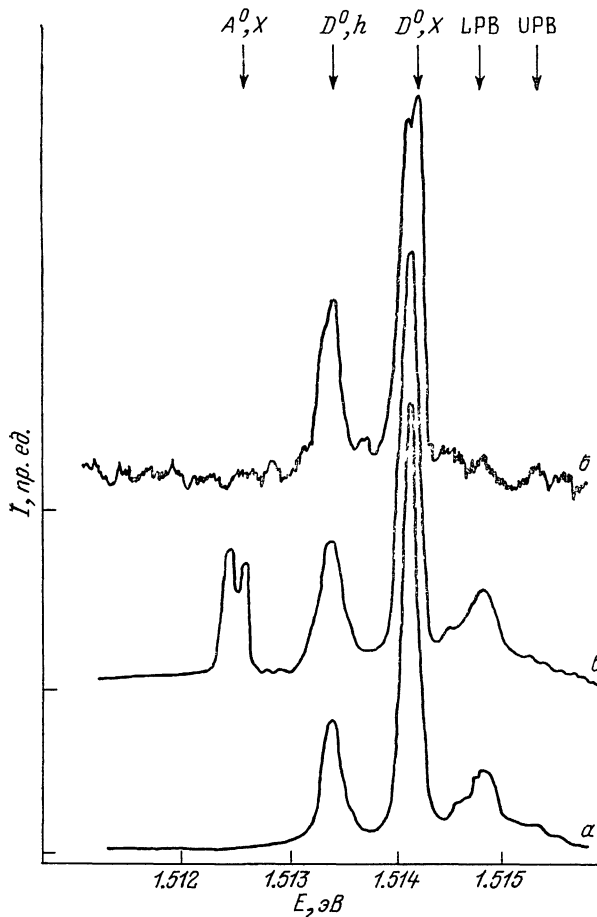


Рис. 1. Спектры люминесценции n -GaAs в момент действия оптической накачки.

α — слабая компенсация, β — сильная компенсация, γ — с задержкой $t_{\text{зад}} = 1-10$ мкс относительно импульса накачки. I — интенсивность.

Наличие в задержанном спектре люминесценции линий (D^0, X) , (D^0, h) через столь большое время после окончания возбуждения свидетельствует об аномально медленном уменьшении концентрации неосновных носителей. Действительно, отсутствие в задержанном спектре излучения, обусловленного свободным экситоном, указывает на то, что задерживаются носители одного знака. Поскольку при температуре $T = 2$ К в n -GaAs всегда имеются нейтральные доноры, на которых находятся электроны, то можно сделать вывод, что за медленный хвост $I(t)$ ответственны дырки h . Таким образом, если быстрый спад люминесценции (D^0, h) отражает время жизни свободных дырок в валентной зоне, то микросекундный хвост $I(t)$ обязан медленной подпитке свободных дырок из некоторых локализованных состояний (ЛС), на которые захватывается часть дырок. Для определения механизма выброса дырок из локализованных состояний нами исследовалась зависимость времени τ долговременного затухания фотолюминесценции от температуры $f(T)$ и интенсивности возбуждения $B(I_0)$. Зависимость $f(T)$ представлена на рис. 3. Видно, что увеличение температуры

на порядок не ускоряет высвобождения дырок из локализованных состояний в валентную зону, т. е. этот процесс не требует термической энергии. Это указывает на то, что поставка дырок в валентную зону осуществляется в результате спонтанного распада метастабильных состояний.

Мы предлагаем модель, в которой безактивационный выброс дырки в валентную зону осуществляется в результате спонтанного распада центров, захватив-

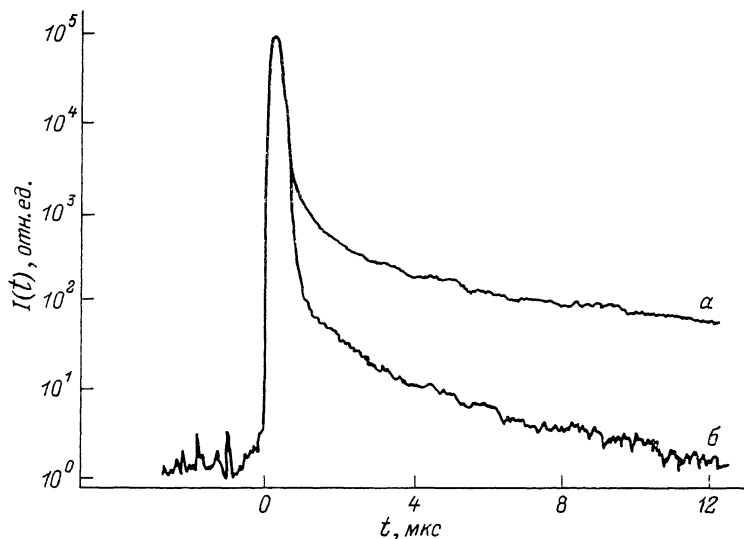


Рис. 2. Нормированные кривые затухания $I(t)$ линии (D^0, h) для различных образцов n -GaAs.

a — слабая компенсация, *б* — сильная компенсация.

ших во время оптического возбуждения дырки. Центр с двумя дырками, находящимися в возбужденном состоянии, распадается посредством оже-процесса. Возможные схемы этого процесса показаны на рис. 4 [4]. При этом одна из дырок переходит в другое связанное состояние, а вторая выбрасывается в валентную зону и рекомбинирует излучательно с электроном на мелком доноре, формируя линию люминесценции (D^0, h) . В этом случае медленная кинетика

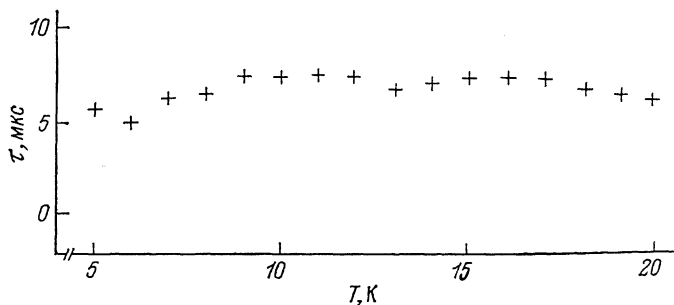


Рис. 3. Зависимость времени медленного затухания люминесценции от температуры T .

люминесценции (D^0, h) отражает время τ выброса дырки в валентную зону. Оценка времени оже-распада, сделанная в рамках подхода, изложенного в работе [5] с использованием характерных параметров глубоких центров в GaAs [6], дает величину $\tau \cong 10^{-6}$ с, что по порядку величины согласуется с экспериментальным значением ($6 \cdot 10^{-6}$ с). Данная модель предполагает наличие запрета на переход центра в основное состояние, что может быть обусловлено симметрией состояний центра или (и) сильным электрон-фононным взаимодействием [7].

В результате обработки измерений затухания ФЛ при различных интенсивностях оптического возбуждения получена зависимость величины $B(I_p) =$

$$= \int_{t_i}^{t_f} I(t) dt \Big/ \int_0^{t_f} I(t) dt$$
 от I_g , представленная на рис. 5. На вставке показаны нормированные кривые затухания для двух интенсивностей возбуждения. Величина $B(I_g)$ характеризует относительное количество центров, которые,

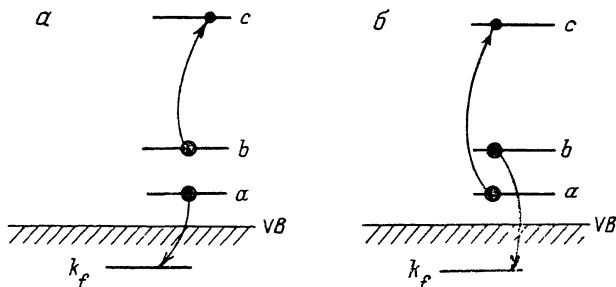


Рис. 4. Возможные схемы оже-распада центра с двумя дырками, находящимися в возбужденном состоянии [4].

распадаясь, поставляют дырки в валентную зону. Видно, что при $I_g < 20 \text{ Вт/см}^2$ величина $B(I_g)$ с ростом I_g увеличивается. Поскольку вероятность захвата

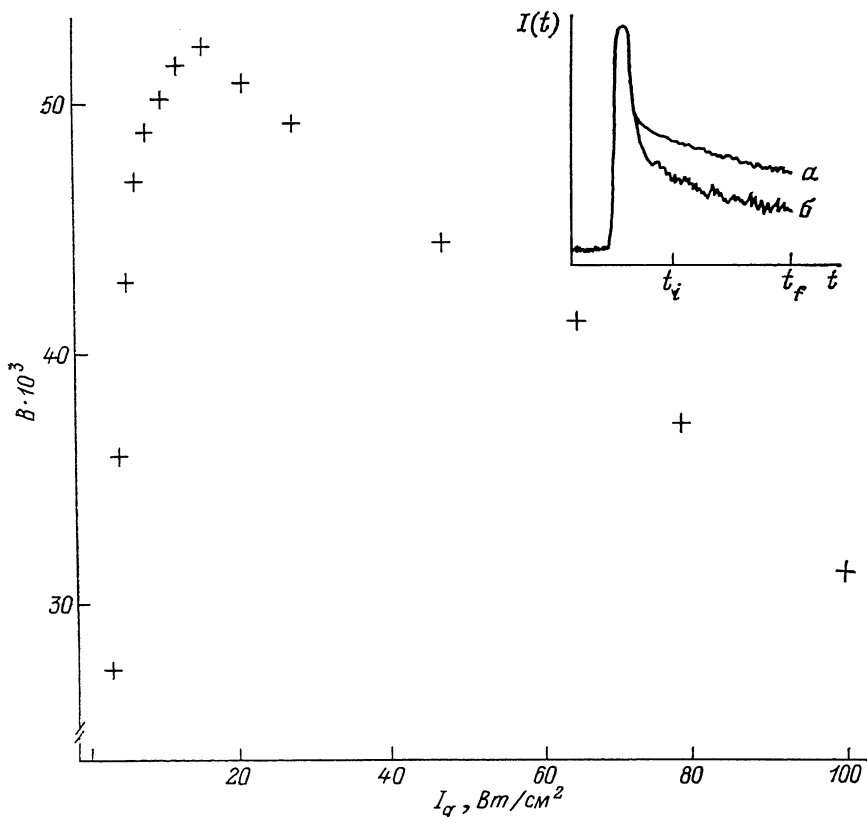


Рис. 5. Зависимость B от интенсивности оптического возбуждения I_g . На вставке — нормированные кривые затухания $I(t)$ для различных уровней возбуждения, а — $I_g = 20 \text{ Вт/см}^2$, б — $I_g = 2 \text{ Вт/см}^2$.

двух дырок на один центр возрастает с ростом концентрации фотовозбужденных носителей, то рост $B(I_g)$ с увеличением I_g согласуется с предположением о захвате двух дырок на центр. При дальнейшем увеличении I_g наблюдается спад $B(I_g)$, что объясняется насыщением центров, захватывающих две дырки. Не-

обходимо отметить, что соотношение имеет место при достаточно малой интенсивности накачки I_g . Это обусловлено определяющей ролью глубоких центров в процессе захвата фотовозбужденных дырок. Важная роль глубоких центров в захвате неосновных носителей в эпитаксиальных слоях n -GaAs была недавно показана в работе [8].

Таким образом, предложенная модель качественно согласуется с экспериментальными результатами. Кроме того, эта модель позволяет понять природу переходной области затухания $I(t)$ (рис. 2). Действительно, если в рамках данной модели последовательно учитывать состояние мелкого донора, участвующего в формировании линии излучения (D^0, h), то вероятность высвечивания будет зависеть от взаимного пространственного распределения центров, испускающих дырки, и мелких доноров D^0 . В этом случае характер затухания будет аналогичен затуханию донорно-акцепторной рекомбинации [3, 9] с тем отличием, что результатом этого процесса будет не излучательная рекомбинация электрона на доноре с дыркой на акцепторе, а выброс дырки с центра в зону и последующая рекомбинация с электроном на мелком доноре.

В заключение заметим, что приведенные результаты демонстрируют непосредственную связь оже-распада глубоких центров с кинетикой ФЛ вблизи края собственного поглощения. Причем приведенный подход применим и к другим материалам, обладающим зонной структурой, аналогичной GaAs.

Авторы выражают признательность В. А. Харченко за плодотворные дискуссии и помощь в выполнении количественных оценок.

Список литературы

- [1] Акимов А. В., Каплянский А. А., Криволапчук В. В., Москаленко Е. С. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 1. С. 35—39.
- [2] Heim U., Hiesinger P. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 66. N 2. P. 461—470.
- [3] Bimberg D., Munzel H., Steckenborn A., Christen I. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 12. P. 7788—7799.
- [4] Васильев А. Н., Михайлин В. В. Введение в спектроскопию твердого тела. М., 1897. 191 с.
- [5] Гельмонт Б. Л., Харченко В. А., Ясневич И. Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 8. С. 2351—2360.
- [6] Мастеров В. Ф., Саморуков Б. Е. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 4. С. 625—652.
- [7] Henry C. H., Lang D. V. // Phys. Rev. B. 1977. V. 15. N 2. P. 989—1016.
- [8] Акимов А. В., Жилиев Ю. В., Криволапчук В. В., Шофман В. Г. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 82—92.
- [9] Williams E. W., Barry Bebb // Simicond. a. Semimet. / Ed. by R. K. Willardson, A. C. Beer. N. Y.—London, 1972. V. 8. P. 472.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 18.10.1990
Принята к печати 14.12.1990