

**ВРЕМЕНА МЕЖЗОННОЙ ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ С УЧАСТИЕМ
СПИН-ОРБИТАЛЬНО ОТЩЕПЛЕННОЙ ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЫ
В КРИСТАЛЛАХ GaSb p-ТИПА**

А.Н.Титков, Г.В.Бенеманская, Г.Н.Илуридзе

В работе впервые определена эффективность межзонной оже-рекомбинации электронов и дырок с участием спин-орбитально отщепленной валентной зоны в прямозонных полупроводниках p-типа (на примере кристаллов GaSb).

В полупроводниковых кристаллах p -типа, обладающих близкими значениями ширины запрещенной зоны E_g и величины спин-орбитального расщепления Δ , возможна эффективная межзонная оже-рекомбинация электрона и дырки с возбуждением второй дырки в спин-орбитально отщепленную валентную зону (CHSH процесс). Результаты теоретических исследований этого процесса [1 – 4] показывают, что он может явиться основным механизмом, ответственным за снижение квантового выхода люминесценции и уменьшение времен жизни носителей при легировании в целом ряде соединений группы A_3B_5 . Уменьшение интенсивности люминесценции, вызванное CHSH процессом, наблюдалось в легированных кристаллах GaSb [5] и InAs [6]. В то же время надежное количественное описание процесса все еще получено не было: результаты известных теоретических работ сильно отличаются, а экспериментальные исследования явно недостаточны.

Так для кристаллов GaSb теоретические оценки коэффициента оже C_p разнятся на четыре порядка от 10^{-28} [1] до 10^{-24} см⁶·сек⁻¹ [3]. Экспериментально эффективность оже-рекомбинации в GaSb изучалась только косвенно по изменению интегральной интенсивности люминесценции с легированием [5], где при 77 К была получена оценка $C_p = 10^{-25}$ см⁶·сек⁻¹, приводящая, однако, к слишком коротким временам: 10^{-13} сек при концентрации дырок $p = 10^{19}$ см⁻³.

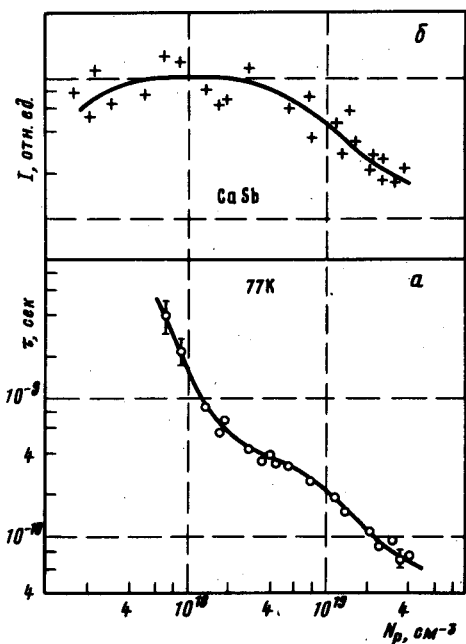


Рис. 1

Рис. 1. Зависимости времен жизни фотоэлектронов (а) и интегральной интенсивности люминесценции (б) от уровня легирования кристаллов GaSb p -типа

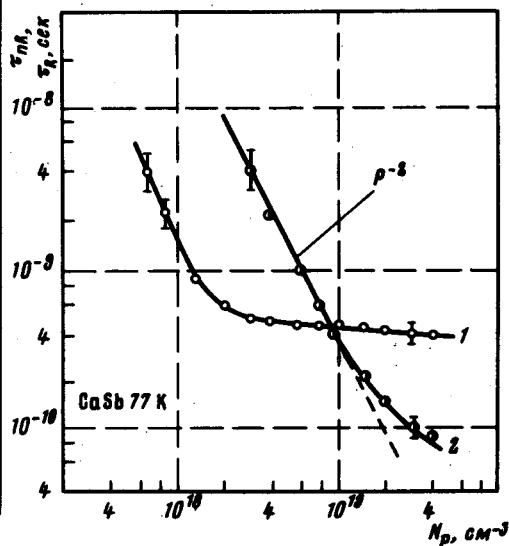


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости излучательных τ_R (кривая 1) и безызлучательных (кривая 2) времен жизни от уровня легирования

В настоящей работе впервые проведено непосредственное изучение времен жизни фотоэлектронов в кристаллах GaSb p -типа в диапазоне

легирования (Zn) $5 \cdot 10^{17} \leq N_p \leq 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$. Времена жизни определялись методом оптической ориентации, позволяющим находить короткие времена до 10^{-11} сек [7]. Одновременно контролировалось изменение интегральной интенсивности люминесценции с легированием.

Зависимость времен жизни фотоэлектронов τ от уровня легирования представлена на рис. 1, а. Ее ход свидетельствует о проявлении в изучаемом интервале легирования двух процессов рекомбинации. Первый процесс вызывает быстрое уменьшение времен жизни со стороны меньших концентраций и насыщается при $N_p \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При более сильном легировании наблюдается новое уменьшение времен жизни, свидетельствующее о подключении второго процесса. Изменение интегральной интенсивности люминесценции с легированием, приведенное на рис. 1, б, демонстрирует различный характер этих процессов: усиление с легированием первого процесса не вызывает изменения интенсивности люминесценции, тогда как подключение второго процесса приводит к быстрому ослаблению люминесценции. В работе [5] было показано, что второй процесс обуславливается межзонной оже-рекомбинацией и является CSHH процессом.

Для точного выделения отвечающих CSHH процессу времен жизни τ_{nR} необходимо также установить природу рекомбинации и в области более слабого легирования. В работе [5] для кристаллов с уровнем легирования $N_p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ было найдено значение внутреннего квантового выхода $\eta \approx 10^{-3}$, на основании чего было сделано заключение о безызлучательном характере рекомбинации и в этой области легирования. Однако, этот вывод не согласуется с некоторыми известными данными и результатами наших исследований. Кристаллы GaSb с уровнем легирования $N_p \approx 2 - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ характеризуются значениями $\eta = 0,5 - 0,8$ [8]. В то же время на рис. 1, б видно, что увеличение N_p от $2 \cdot 10^{17}$ до $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ приводит к возрастанию интенсивности люминесценции примерно в 1,5 - 2 раза. Это позволяет предположить, что величина квантового выхода в области плато на рис. 1, б на самом деле близка к единице, и рекомбинация здесь должна носить излучательный характер. Этот вывод подтверждается и результатами сравнения полученных значений времен жизни τ с теоретическими оценками эффективности излучательной рекомбинации в GaSb ($\tau_R = 1,3 \cdot 10^{-9}$ сек при $N_p = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $T = 77 \text{ К}$ [9]).

В случае конкуренции излучательного и безызлучательного процессов рекомбинации изменение интегральной интенсивности люминесценции с легированием описывается простым выражением $I = A\eta$. Здесь A — константа, определяемая уровнем возбуждения и параметрами экспериментальной установки, $A = I$, когда $\eta = 1$. Величина внутреннего квантового выхода определяется выражением $\eta = \tau_{nR} / (\tau_{nR} + \tau_R)$. Измеряемые времена жизни фотоэлектронов равняются $\tau = \tau_{nR} \tau_R / (\tau_{nR} + \tau_R)$. Видно, что одновременные измерения величин τ и I позволяют независимо определять времена излучательной и безызлучательной рекомбинации.

Найденные зависимости времен τ_R и τ_{nR} от уровня легирования представлены на рис. 2 (кривые 1 и 2, соответственно). Обращает на себя внимание резкое замедление спада излучательных времен жизни в области легирования $N_p \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, где вследствие металлизации

акцепторов дырки являются свободными и вырожденными при 77 К [10]. Ранее в работе [11] предсказывалось существование у излучательных времен жизни в вырожденных кристаллах минимальных значений τ_{R_0} . Наблюдаемые времена близки к ожидаемому для GaSb значению $\tau_{R_0} = 5,5 \cdot 10^{-10}$ сек.

Безызлучательные времена τ_{nR} , соответствующие CHSH процессу, были определены в области вырождения дырок (кривая 2 на рис. 2). Первоначально они уменьшаются обратно пропорционально квадрату концентрации дырок $\sim p^{-2}$ (в вырожденных кристаллах $p = N_p$) и затем несколько медленнее при $p > 10^{19}$ см⁻³. В области выполнения зависимости $\tau_{nR} \sim p^{-2}$ найдено значение коэффициента Оже $C_p = 2,5 \cdot 10^{-29}$ см⁶ · сек⁻¹.

Полученное значение оказалось существенно меньше всех известных теоретических оценок величины C_p для кристаллов GaSb. При этом наименьшее достигнутое значение безызлучательных времен равняется $\tau_{nR} = 0,8 \cdot 10^{-10}$ сек при $p = 4 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Причину наблюдаемого расхождения, очевидно, следует искать, как отмечалось в работе [12], в сложившемся неправильном подходе к оценке интегралов перекрытия волновых функций электронов и дырок при пороговых для CHSH процесса значениях волновых векторов носителей. Согласно [12], сложный подход должен приводить именно к завышению теоретических оценок.

Замедление спада времен τ_{nR} при $p > 10^{19}$ см⁻³ является ожидаемым для CHSH процесса эффектом, связанным с усилением экранирования электрон-дырочного взаимодействия по мере роста концентрации дырок.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Б.Л. Гельмонта, В.И. Сафарова и З.Н. Соколову за полезные дискуссии.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР*

Поступила в редакцию
6 августа 1981 г.

Литература

- [1] Takeshima M. J. of Appl. Phys., 43, 1972, 4114.
- [2] Рогачев А.А., Михайлова М.Е., Яснеевич И.Н. ФТП, 11, 1977, 352.
- [3] Haug A., Kerkhoff D., Lochman W. Phys. Stat. Sol., (b) 89, 1978, 357.
- [4] Sugimura A. J. of Appl. Phys., 51, 1980, 4405.
- [5] Benz G., Conradt R. Phys. Rev., B16, 1977, 843.
- [6] Зотова Н.В., Яснеевич И.Н. ФТП, 11, 1977, 1882
- [7] Гарбузов Д.З., Якимов А.И., Сафаров В.И. Письма в ЖЭТФ, 13, 1971, 24.
- [8] Benoit a' la Guillaume C., Lavallard P. Phys. Rev., B5, 1972, 4900.
- [9] Мосс Т., Баррелл Д., Элмс Б. Полупроводниковая оптоэлектроника, М., Мир, 1976, стр. 206.
- [10] Титков А.Н., Чайкина Е.И., Комова Э.М., Ермакова Н.Т. ФТП, 15, 1981, 345.

[11] *Dumke W.* Phys. Rev., 132, 1963, 1998.

[12] *Гельмонт Б.Л.* ЖЭТФ, 75, 1978, 536.
