

- [5] Вейс А. Н., Кайданов В. И., Крупницкая Р. Ю., Мельник Р. Б., Немов С. А. Особенности эффекта Холла и спектров коэффициента поглощения в сильно компенсированных образцах халькогенидов свинца. — ФТП, 1980, т. 14, в. 12, с. 2349—2356.
- [6] Вейс А. Н. Температурные зависимости положения квазилокальных уровней в PbTe, легированном примесями III группы. — ФТП, 1987, т. 21, в. 2, с. 263—266.
- [7] Рыков С. А. Туннельная спектроскопия теллурида свинца. — Автореф. канд. дис. Л., 1985.
- [8] Волков Б. А., Панкратов О. А. Электронная структура точечных дефектов в полупроводниках A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup>. — ЖЭТФ, 1985, т. 88, в. 1, с. 280—293.
- [9] Бытеский Л. И., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А., Равич Ю. И. Самокомпенсация акцепторов вакансиями в сульфиде и селениде свинца, легированном таллием. — ФТП, 1980, т. 14, в. 1, с. 74—79.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Получено 30.07.1987  
Принято к печати 23.08.1987

ФТП, том 22, вып. 2, 1988

## ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В *p*-GaAs, ОБЛУЧЕННОМ ИОНАМИ КИСЛОРОДА

Журавлев А. Б., Марущак В. А., Портной Е. Л.,  
Стельмах Н. М., Титков А. Н.

В работе [1] было высказано предположение, что имплантация в GaAs ионов кислорода большой энергии должна приводить к уменьшению времени жизни неравновесных носителей до значений пикосекундного диапазона.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования рекомбинации фотоэлектронов в GaAs *p*-типа после облучения ионами кислорода с энергией 18.7 МэВ. Изучались две серии образцов, легированных германием до уровней  $4 \cdot 10^{16}$  и  $1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и различавшихся до облучения скоростями как излучательной, так и безызлучательной рекомбинации. Для всех образцов были получены спектры люминесценции в диапазоне 0.7 ÷ 2.4 мкм и определены времена жизни неравновесных электронов. Малые значения времен жизни измерялись методом оптической ориентации [2, 3], использованным ранее [4] для нахождения времен пикосекундной длительности в GaSb.

В методе оптической ориентации возбуждение кристаллов осуществляется циркулярно поляризованным светом. При этом люминесценция, связанная с рекомбинацией свободных электронов, также оказывается циркулярно поляризованной. Времена жизни фотоэлектронов в зоне проводимости  $\tau$  определяются из измерений степени циркулярной поляризации люминесценции  $\rho = 0.25 / (1 + \tau/\tau_s)$  и ее уменьшения во внешнем магнитном поле  $B$ , перпендикулярном лучу возбуждающего света  $\rho(B) = \rho / (1 + \Omega^2 T^2)$  (эффект Ханле). В этих формулах  $\tau_s$  — время спиновой релаксации электронов,  $\Omega = g_s \mu_B B / \hbar$  — частота ларморовой прецессии,  $g_s$  —  $g$ -фактор электрона,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $T = (1/\tau + 1/\tau_s)^{-1}$  — время жизни ориентированного спина. По результатам этих двух измерений время  $\tau$  находится с помощью выражения

$$\tau = \frac{0.25}{\rho} \frac{1.1}{g_s \Delta B} \cdot 10^{-10}. \quad (1)$$

Здесь  $\tau$  выражено в секундах, если  $\Delta B$  в теслах;  $\Delta B$  — значение магнитного поля, при котором начальная поляризация падает вдвое:  $\rho(\Delta B) = 1/2 \rho$ . Для GaAs  $g_s = -0.44$  [5], и из выражения (1) следует, что времена жизни фотоэлектронов порядка 10 пс и короче могут быть измерены при приложении магнитных полей всего в несколько Т.

В работе значения  $\tau$  находились из анализа степени циркулярной поляризации полосы люминесценции, обусловленной переходами зона—акцептор. Возбуждение люминесценции осуществлялось линией криптонового лазера

7525 Å (1.647 эВ). Исследования проводились в основном при температуре 77 К, поскольку высокая интенсивность люминесценции в этом случае позволяла измерять времена жизни в образцах с большими дозами облучения.

Спектры люминесценции необлученных образцов обеих серий различались как по структуре, так и по интенсивности. Для слабо легированных кристаллов они состояли из двух краевых полос, обусловленных переходами зона—зона и зона—акцептор [6]. В сильно легированных кристаллах присутствовала только одна краевая полоса, обусловленная переходами зона—акцептор. Наряду с краевой в этих кристаллах наблюдались еще две полосы (1.35 и 0.68 эВ), свидетельствовавшие о наличии рекомбинации через глубокие центры [7, 8].

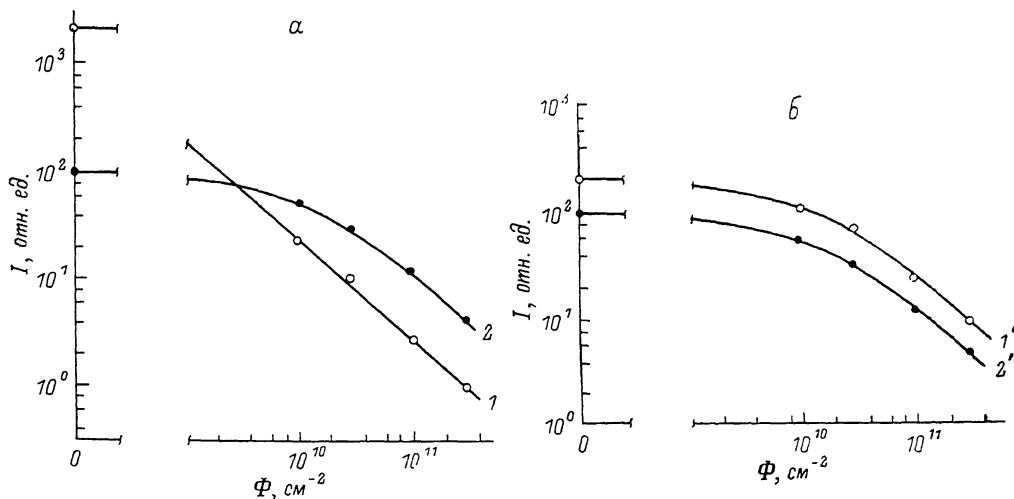


Рис. 1. Зависимость интенсивности краевой люминесценции (а) и люминесценции через глубокие центры (б) от дозы облучения в GaAs.

Концентрация акцепторов  $N_A$ ,  $\text{см}^{-3}$ : 1 —  $4 \cdot 10^{18}$ , 2 —  $10^{18}$ ; 1' — полоса 1.35, 2' — полоса 0.68 эВ. Данные получены при 77 К.

Облучение ионами кислорода не приводило к заметному изменению структуры и формы полос люминесценции или к появлению новых линий. Влияние облучения сводилось к последовательному уменьшению с ростом дозы интегральной интенсивности всех полос, как видно из данных, приведенных на рис. 1. Одновременно происходило и уменьшение времени жизни фотоэлектронов в зоне проводимости (рис. 2).

Сопоставление зависимостей рис. 1 и 2 позволяет сделать следующие заключения. До облучения менее легированные образцы характеризуются значением времени жизни фотоэлектронов  $1 \cdot 10^{-8}$  с, что близко к оценкам излучательных времен  $(1 \div 3) \cdot 10^{-8}$  с [6, 9]. Поэтому можно считать, что рекомбинация носителей в них носит преимущественно излучательный характер. Для более легированных образцов оценка излучательных времен жизни составляет  $(2 \div 3) \times 10^{-9}$  с [6, 9], что на порядок превышает измеренное нами значение. Таким образом, в образцах второй серии рекомбинация изначально носит безызлучательный характер, что проявляется в соответственно меньшей интегральной интенсивности краевой люминесценции. Природу доминирующего здесь безызлучательного процесса естественно связать с рекомбинацией через глубокие центры, проявившейся и в спектрах люминесценции.

Облучение ионами кислорода в обоих случаях приводит к уменьшению времен жизни неравновесных электронов. При этом в менее легированных кристаллах, в которых исходные значения  $\tau$  велики, введенный облучением безызлучательный канал рекомбинации начинает преобладать уже при малых дозах. Это позволило отчетливо наблюдать линейную зависимость эффективности этого канала от дозы облучения. В более легированных кристаллах введенный канал становится основным лишь при сравнительно больших дозах. При  $\Phi = 3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  времена жизни неравновесных электронов в образцах обеих серий

практически совпадают, что свидетельствует о независимости эффективности введенного канала от концентрации легирующей примеси. Об этом же говорит и большая интенсивность люминесценции в сильно легированных кристаллах при высоких дозах облучения. Различие интенсивностей в 5—6 раз полностью объясняется различием скоростей излучательной рекомбинации в образцах разных серий.

Сравнительно яркая люминесценция в облученных образцах более легированной серии позволила провести для них измерения времен жизни фотоэлектронов и при 300 К. Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что скорость рекомбинации за счет безызлучательного канала, вводимого при облучении, практически не зависит от температуры. Незначительное же уменьшение времени жизни в облученных кристаллах является следствием ускорения с температурой рекомбинации в исходных кристаллах. Это ускорение мы связываем с подключением при 300 К безызлучательной поверхностной рекомбинации в исследованных образцах с незащищенной поверхностью [10].

Таким образом, проведенные исследования показали, что облучение GaAs

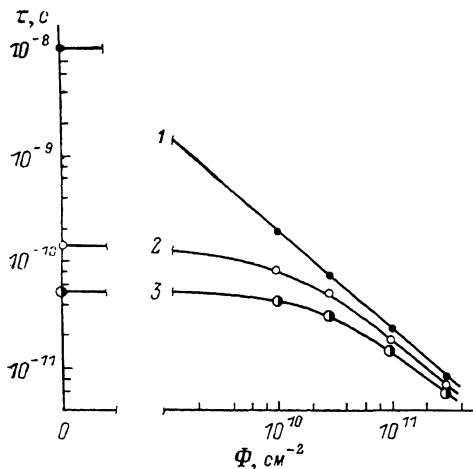


Рис. 2. Изменение времени жизни неравновесных электронов с ростом дозы облучения в образцах GaAs, легированных до уровней  $4 \cdot 10^{16}$  (1) и  $1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (2, 3).

Т, К: 1, 2 — 77, 3 — 300.

ионами кислорода высокой энергии приводит к возникновению эффективного канала безызлучательной рекомбинации, уменьшающего время жизни электронов до единиц пикосекунд при дозах облучения  $\Phi \geq 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Изучение спектров люминесценции облученных образцов не выявило существенных ухудшений свойств светящихся областей. Поэтому можно предположить, что природа возникающего безызлучательного процесса связана с захватом носителей каналами сильного разупорядочения кристаллической решетки, возникающими на пути торможения ионов кислорода.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Алфёров Ж. И., Журавлев А. Б., Портной Е. Л., Стельмах Н. М. Генерация пикосекундных импульсов в инжекционных гетеролазерах с модулированной добротностью. — Письма ЖТФ, 1986, т. 12, в. 18, с. 1093—1098.
- [2] Parsons R. R. — Canad. J. Phys., 1971, v. 49, N 17, p. 1850—1860.
- [3] Optical orientation / Ed. by F. Meier, B. P. Zakharchenya. Amsterdam, 1984. 523 p.
- [4] Титков А. Н., Илуридзе Г. Н., Миронов И. Ф., Чебан В. Н. Межзонная оже-рекомбинация с участием спин-орбитально отщепленной валентной зоны в кристаллах GaSb р-типа. — ФТП, 1986, т. 20, в. 1, с. 25—34.
- [5] Landolt-Börnstein Tables, v. 17a. Berlin, 1982. 642 p.
- [6] Гарбузов Д. З., Халфин В. Б., Трукан П. К., Агафонов В. Г., Абдуллаев А. Температурная зависимость эффективности и времен излучательных переходов в прямозонных полупроводниках типа GaAs. — ФТП, 1978, т. 12, в. 7, с. 1368—1379.
- [7] Ai-zhen Li, Shang-heng Xin, Milnes A. G. — J. Electron. Mater., 1983, v. 12, N 1, p. 71—91.
- [8] Phil Won Yu, Holmes D. E., Chen R. T. — In: Inst. Phys. Conf. Ser., 1982, N 63, p. 209—214.
- [9] Гарбузов Д. З., Халфин В. Б. Эффективность и времена излучательных переходов в прямозонном полупроводнике типа GaAs. — Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1980. 54 с.
- [10] Илуридзе Г. Н. Межзонная оже-рекомбинация с участием спин-орбитально отщепленной валентной зоны в соединениях III—V. — Автореф. канд. дис. Л., 1986.