

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ $\delta$ -*p*-ЛЕГИРОВАННОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

А.М.Гилинский, К.С.Журавлев, Д.И.Лубышев,  
В.П.Мигаль, Б.Р.Семягин

Методом низкотемпературной фотолюминесценции исследовались механизмы излучательной рекомбинации в  $\delta$ -*p*-легированном GaAs. Обнаружены интенсивные линии люминесценции, свидетельствующие о рекомбинации фотоэлектронов с размерно-квантованными дырками.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию транспортных и рекомбинационных характеристик полупроводниковых структур, содержащих  $\delta$ -легированные слои. В работе <sup>1</sup> изучались процессы рекомбинации носителей заряда в образцах арсенида галлия, содержащих одиночные  $\delta$ -легированные слои *n*-типа проводимости. Авторами не было обнаружено линий люминесценции, связанных с излучательной рекомбинацией электронов, заключенных в двумерную потенциальную яму  $\delta$ -слоя; влияние  $\delta$ -легирования проявлялось в деформации линий объемной экситонной рекомбинации при приложении сильного магнитного поля. В отличие от этих результатов, в данной работе сообщается об обнаружении в спектрах люминесценции  $\delta$ -*p*-легированного арсенида галлия новых высокointенсивных линий, по-видимому связанных с излучательной рекомбинацией с участием дырок, размерно-квантованных потенциалом  $\delta$ -слоя.

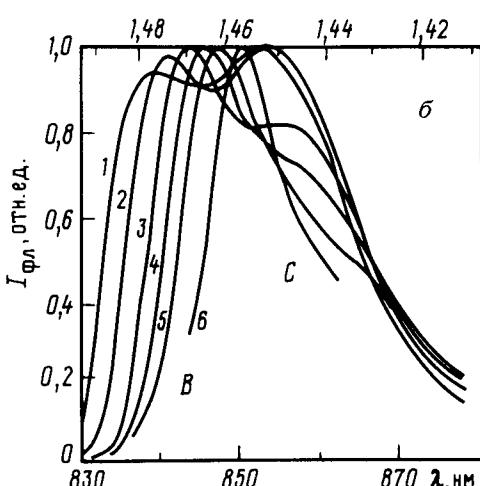
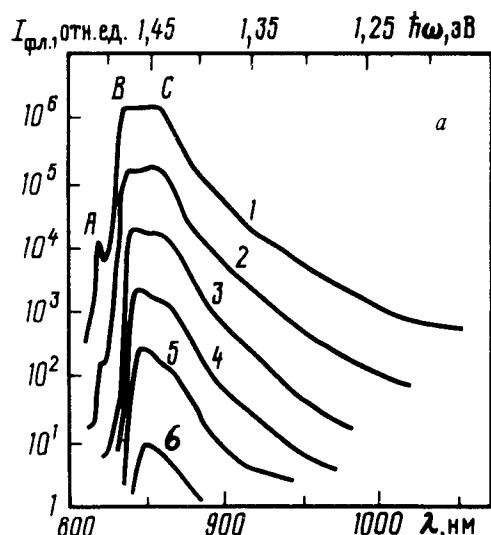


Рис. 1 *a*, *b*. Спектры люминесценции образца с одиночным  $\delta$ -*p*-легированным слоем при различных интенсивностях фотовозбуждения  $I/I_0$ : кривая 1 – 1,0; 2 –  $10^{-1}$ ; 3 –  $10^{-2}$ ; 4 –  $10^{-3}$ ; 5 –  $10^{-4}$ ; 6 –  $10^{-5}$  ( $I_0 \approx 20 \text{ Вт}/\text{см}^2$ )

Исследовавшиеся образцы выращивались методом МЛЭ на полуизолирующих подложках GaAs (110) со скоростью 1 мкм/ч при температуре 480°C и представляли собой специально не легированный эпитаксиальный арсенид галлия (концентрация носителей  $p_{77K} \approx (N_A - N_D) \lesssim \lesssim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), в котором методом прерывания роста формировался слой, легированный бериллием; концентрация дырок на единицу поверхности равнялась  $p_{77K} \approx 1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялось гелий-неоновым лазером, спектры

измерялись при температуре 2,2 К. Регистрация люминесценции производилась фотоэлектронным умножителем с фотокатодом S-1, работавшим в режиме счета фотонов.

На рис. 1а приведены измеренные при различных значениях интенсивности возбуждения спектры ФЛ образца, содержащего одиночный  $\delta$ -легированный слой. В спектрах присутствует линия A, совпадающая по энергетическому положению с линиями экзитонной рекомбинации в объемном материале, высокоинтенсивные линии B, C и протяженный длинноволновый "хвост". Рост интенсивности возбуждения приводит к увеличению относительной интенсивности линии A и изменению соотношения интенсивностей линий B, C; форма и относительная интенсивность длинноволнового хвоста от степени возбуждения практически не зависят. Доминируют в спектрах линии B, C ( $1,440 \div 1,485$  эВ), не наблюдаемые в спектрах ФЛ образцов, не содержащих  $\delta-p$ -слоев. На рис. 1б спектры в интервале энергий  $1,40 \div 1,50$  эВ показаны в нормированном виде. Видно, что при увеличении интенсивности возбуждения происходит сдвиг линий B, C в коротковолновую сторону (приблизительно логарифмически с интенсивностью) с одновременным увеличением интенсивности люминесценции длинноволновой линии C.

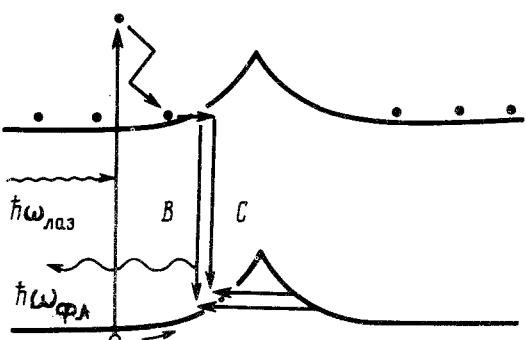


Рис. 2. Модельная энергетическая диаграмма структуры в возбужденном состоянии, поясняющая механизмы рекомбинации носителей. Прямые стрелки обозначают генерационные и рекомбинационные переходы, а также термализацию носителей; волнистые линии обозначают фотоны возбуждения и люминесценции

Мы интерпретируем описанные экспериментальные результаты в качественной модели, основанной на предположении о преобладании в данной структуре туннельного механизма излучательной рекомбинации геометрически разделенных фотоэлектронов и дырок. На рис. 2 приведена энергетическая диаграмма, поясняющая используемую модель. Здесь электрическое поле дырочной потенциальной ямы, созданной сильнолегированным  $\delta$ -слоем, приводит к пространственному разделению дырок, занимающих два уровня размерного квантования в потенциальной яме, и термализованных фотоэлектронов и, следовательно, к необходимости туннелирования носителей сквозь потенциальный барьер для рекомбинации. При этом из-за низкой, по сравнению с объемным материалом, вероятности рекомбинации стационарное значение концентрации электронов сравнительно велико, а изгиб зон в объеме структуры мал. Повышение уровня фотовозбуждения, увеличивая степень экранировки потенциала ямы свободными носителями, приводит к сужению ямы и вытеснению из нее дырочных уровней. Одновременно из-за уменьшения расстояния между электронами и дырками увеличивается относительная вероятность рекомбинации электронов с дырками, расположенными на низкоэнергетическом уровне. Это приводит к коротковолновому сдвигу линий B, C и нарастанию относительной интенсивности линии C с увеличением степени возбуждения. В данной модели высокая эффективность излучательной рекомбинации пространственно разделенных носителей в случае  $\delta-p$ -легирования объясняется достаточно малой шириной потенциальной ямы для дырок по сравнению с шириной ямы для электронов в  $\delta-n$ -легированных образцах. Вероятными механизмами, обуславливающими большую ширину линий B, C (около 15 мэВ), являются флуктуации по площади образца размеров потенциальной ямы и положения в ней дырочных уровней из-за статистических флуктуаций концентрации дырок либо флуктуаций диффузационного смещения атомов примеси из  $\delta$ -легированной плоскости, а

также возможность рекомбинационных переходов с нарушением сохранения квазимпульса.

Другим существенным отличием спектров ФЛ рис. 1 от спектров ФЛ пространственно однородных образцов является длинноволновый хвост. Причина возникновения хвоста в настоящее время не ясна, однако наиболее вероятными механизмами, приводящими к появлению в спектрах широких длинноволновых полос, мы считаем рекомбинацию электронов с дырками в хвостах плотности состояний  $\delta$ -слоя, а также излучательную рекомбинацию носителей через глубокие уровни комплексов бериллий — точечные дефекты решетки<sup>2</sup>.

Таким образом, в данной работе сообщается об обнаружении в спектрах люминесценции  $\delta-p$ -легированного арсенида галлия новых линий, свидетельствующих об излучательной рекомбинации фотоэлектронов и размерно-квантованных потенциалом легированного слоя дырок.

#### Литература

1. Perry C.H. et al. Surface Science, 1988, **196**, 677.
2. Журавлев К.С. и др. Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конференции по росту кристаллов, 1988, **4**, 45.

Институт физики полупроводников  
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
3 июля 1989 г.