

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ ФОТОДЫРОК, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В ПОТЕНЦИАЛЕ δ -ЛЕГИРОВАННЫХ *nini*-СВЕРХРЕШЕТОК

В.Л.Альперович, К.С.Журавлев, Д.И.Лубышев,
В.П.Мигаль, Б.Р.Семягин

В спектрах низкотемпературной люминесценции δ -легированных GaAs *nini*-сверхрешеток обнаружены новые полосы, обусловленные межзонной и экситонной рекомбинацией электронов из δ -слоев и фотодырок, локализованных в потенциале сверхрешетки.

В работе ¹ был предсказан, а в ² — экспериментально обнаружен экситон, связанный с двумерным электронным газом у поверхности кремния. Представляет интерес вопрос о существовании экситона, связанного с двумерным газом δ -легированных слоев, находящихся в объеме полупроводника. В ³ экспериментально показано, что спектры фотолюминесценции (ФЛ) структур с одиночным δ -слоем *n*-типа, в отличие от *p*-типа ⁴, не содержат линий, связанных с наличием δ -слоя. Причина состоит, по-видимому, в том, что в *n*- δ слое заполнено несколько квантовых подзон ⁵. Как следствие, происходит эффективное пространственное разделение фотодырок и электронов в протяженном, превышающем борковский радиус экситона, потенциале *n*- δ -слоя.

В данной работе экспериментально изучены спектры ФЛ δ -*nini*-сверхрешеток (СР), состоящих из эквидистантных *n*- δ -слоев. Благодаря локализации фотодырок в потенциале СР, обнаружена полоса ФЛ, обусловленная рекомбинацией фотодырок с электронами из δ -слоев. В спектрах наблюдается также новая линия, связанная, предположительно, с излучательной рекомбинацией экситона, состоящего из электрона и локализованной в СР фотодырки.

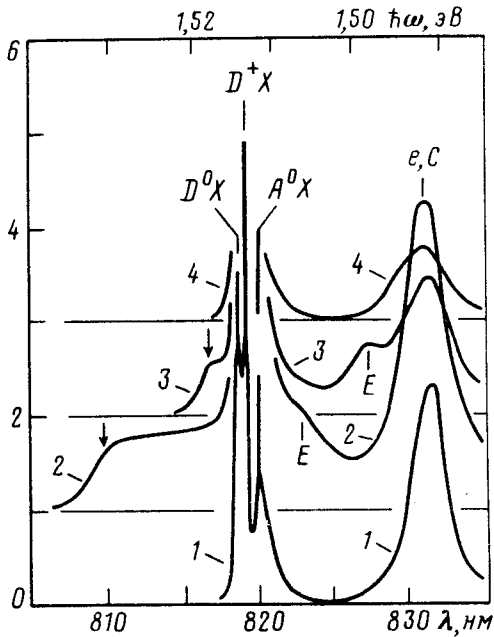


Рис. 1

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивались структуры ⁶ с одиночными *n*- δ -слоями, а также δ -*nini*-сверхрешетки из пяти периодически расположенных *n*- δ -слоев, разделенных нелегированными промежутками GaAs толщиной *d* от 2 до 90 нм и концентрацией доноров (Si) $N^{2D} = (0,5 \div 1,0) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в каждом δ -слое. Спектры ФЛ измерялись при $T = 2 \text{ К}$.

На рис. 1 показаны спектры ФЛ в δ -*nini*-сверхрешеток с $N^{2D} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и различными периодами $d = 7,5$ (кривая 1), $d = 30$ (кривая 2), $d = 45$ (кривая 3) и $d = 60$ нм (кривая 4). Каждая последующая кривая сдвинута по вертикали на одно деление. Установлено, что в СР с малыми ($d \leq 8$ нм) и большими ($d \geq 60$ нм) периодами спектры ФЛ практически совпадают со спектром одиночного n - δ -слоя и не содержат новых линий по отношению к спектрам нелегированного GaAs. В СР с промежуточным периодом (кривые 2 и 3), помимо известных объемных линий экситон-примесных комплексов (D^0X), (D^+X) и (A^0X) и зона-акцепторной рекомбинацией (e, C)³, наблюдается новая полоса ФЛ в виде плато с коротковолновым порогом $\hbar\omega_t$, зависящим от периода d . Положение порога на кривых 2 и 3 указано вертикальными стрелками. Длинноволновое крыло полосы заметно на тех же кривых в промежутке между акцепторной и экситонными линиями. Мы полагаем, что эта полоса обусловлена рекомбинацией фотодырок, локализованных внутри сверхрешетки, с вырожденным электронным газом, образованным частично перекрывающимися n - δ -слоями. Зонная диаграмма δ -*nini*-сверхрешетки показана на рис. 2. Из рис. 2 видно, что положение порога $\hbar\omega_t$ определяется разностью между уровнем Ферми ϵ_F и основным уровнем размерного квантования дырок в потенциальной яме между δ -слоями ϵ_c^h . При уменьшении периода d , пороговая энергия $\hbar\omega_t$ увеличивается по двум причинам. Во-первых, при уменьшении d растет ϵ_0^h , во-вторых, благодаря большему перекрытию n - δ -слоев, энергия Ферми ϵ_F увеличивается относительно положения дна зоны проводимости ϵ_c по середине между δ -слоями. Из рис. 1 видно, что при уменьшении периода с $d = 45$ до 30 нм порог возрастает с $\hbar\omega_t = 1,518$ до 1,530 эВ. Сравнение $\hbar\omega_t$ с шириной запрещенной зоны $\epsilon_g = 1,519$ эВ показывает, что при $d = 45$ нм ϵ_F лежит ниже ϵ_c между δ -слоями. При $d = 30$ нм ϵ_F лежит, по-видимому, выше ϵ_c , и отдельные δ -слои перекрываются, как показано на рис. 2. При уменьшении периода ϵ_0^h возрастает, а амплитуда сверхрешеточного потенциала уменьшается, поэтому при достаточно малых d (по оценке, при $d \leq 10$ нм) в СР отсутствуют состояния дырок, локализованные внутри ям. В результате, как показал эксперимент, в СР с $d < 10$ нм плато в спектре отсутствует.

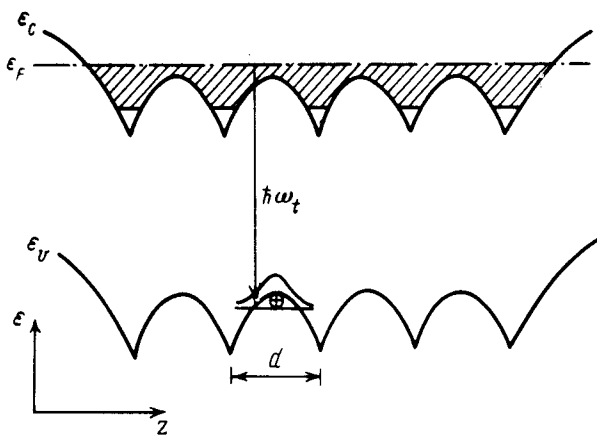


Рис. 2

Из рис. 2 ясно, что при заданном периоде d увеличение концентрации N^{2D} должно приводить к увеличению $\hbar\omega_t$. Это подтвердилось экспериментально. Для сверхрешеток с одинаковым периодом $d = 30$ нм, увеличение N^{2D} с $5 \cdot 10^{12}$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ привело к увеличению $\hbar\omega_t$ с 1,518 до 1,530 эВ.

Наряду с плато, в спектрах ФЛ сверхрешеток с промежуточным периодом наблюдается также новая E -линия, сдвинутая относительно порога $\hbar\omega_t$ в сторону меньших энергий на величину около 20 мэВ. Природа этой линии не ясна. Возможно, E -линия обусловлена излучением экситонов, образованных благодаря кулоновскому притяжению электронов из δ -

слоев и фотодырок в СР. Большой сдвиг E -линии относительно $\hbar\omega_p$, по сравнению с энергией связи экситона в объеме GaAs, может быть объяснен, отчасти, квазидвумерностью экситона, а также тем, что данный экситон, возможно, связан на примесном центре. По-видимому, в данном случае, как и для экситонов, связанных со слоем поверхностного заряда^{1, 2}, экранировка кулоновского взаимодействия свободными электронами ослаблена (по сравнению с однородно-легированным полупроводником), благодаря эффективному пространственному разделению электронов и дырок. Вопрос о стабильности такого экситона остается открытым и должен решаться на основе количественной теории.

Авторы выражают благодарность Н.С.Аверкиеву, Ф.Г.Пикусу и М.Л.Шматову за полезные обсуждения результатов.

Литература

1. Аверкиев Н.С., Пикус Г.Е. ФТП, 1987, 21, 1493.
2. Алтухов П.Д. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 427.
3. Perry C.H. et al. Surf. Science, 1988, 196, 677.
4. Гилинский А.М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1989, 50, 141.
5. Koch F., Zrenner A. Material Science and Engineering, 1989, В1, 221.
6. Мигаль В.П. и др. Электронная промышленность, 1989, № 6, 6.

Институт физики полупроводников
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 ноября 1989 г.