

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕНИЕМ

Андреев В. М., Зимогорова Н. С., Карлина Л. Б.,
Никитин Л. П., Устинов В. М., Васильев А. М.

Представлены результаты исследований электрических и фотолюминесцентных свойств эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, легированных рением.

Показано, что по сравнению с нелегированными слоями эти растворы характеризуются улучшенными электрическими и люминесцентными свойствами. При легировании материала рением наблюдаются возрастание подвижности, уменьшение степени компенсации, изменение структуры спектра фотолюминесценции и увеличение ее интенсивности уже при малых уровнях легирования. Обсуждаются возможные варианты трактовки отмеченных особенностей.

В настоящее время твердые растворы $\text{InGaAs}\langle\text{P}\rangle$ являются основными материалами для обеспечения элементной базы систем волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Рассмотрение свойств твердых растворов InGaAs [1-4] с учетом условий получения показало, что материал с наименьшей фоновой концентрацией, наибольшей подвижностью и наличием экситонного излучения выращивается методом ЖФЭ из длительно отожженного раствора-расплава [2]. Наибольшее число публикаций по свойствам твердых растворов InGaAs посвящено нелегированному материалу; свойства InGaAs , легированного акцепторными и редкоземельными примесями, достаточно полно изучены в работах [1, 4]. Практически не изученным остается поведение изовалентных примесей и переходных элементов, свойства которых в бинарных соединениях $\text{A}^{III}\text{B}^{IV}$ исследуются уже давно [5, 6].

В настоящей работе рассматриваются особенности электрических и люминесцентных свойств твердых растворов InGaAs , легированных рением, переходным элементом группы платины, по сравнению со свойствами нелегированного материала

Экспериментальные результаты

Изопериодический твердый раствор $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ выращивался в виде эпитаксиальных слоев (ЭС) методом ЖФЭ на нелегированных подложках InP ориентаций (111)А, (111)В, (100) из предварительно гомогенизированного раствора-расплава. Концентрация фоновой примеси нелегированных эпитаксиальных слоев InGaAs , а также их люминесцентные свойства весьма существенно зависят от кристаллографической ориентации подложки. Для легирования образцов в раствор-расплав вводился рений. Все слои, полученные в присутствии рения, обладали n -типом проводимости. Концентрация свободных электронов в исследуемых слоях, выращенных на подложках ориентации (111)А, составила для нелегированных слоев $n \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, для легированных Re $n_{300 \text{ K}} = (0.3 \div 3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В ЭС, легированных Re , наблюдаются возрастание подвижности μ_{Re} по сравнению со значением μ_a в нелегированном материале $\mu_{\text{Re}}/\mu_0 = 1.8 \div 1.4$, а также уменьшение степени компенсации ($K=0.3$) в легированных Re слоях по сравнению с $K=0.6$ для нелегированных ЭС (оценка K сделана по методу работы [7]).

Исследование фотолюминесценции (ФЛ) проводилось при $T=1.6, 77$ и 300 К по стандартной методике «на отражение», пзлучение регистрировалось со свободной поверхности ЭС. Источником возбуждения служила линия $\lambda = 1.15$ мкм лазера ЛГ-126; в основном использовался режим слабого возбуждения ($P=3 \cdot 10^{-2} - 1$ Вт/см²), фотоприемниками служили охлаждаемые фотосопротивления PbS и Ge-фотодиод. Изучение ФЛ нелегированных слоев InGaAs ориентаций (111)А и (100) и ЭС, легированных Re, показало (рис. 1), что спектры излучения при 77 К состоят лишь из крайевых полос.

В соответствии с эффектом Мосса—Бурштейна положение максимума полос излучения $h\nu_{Re}$ слоев, легированных рением, смещено в коротковолновую область сильнее, чем для нелегированных ЭС $h\nu_0$ [так, при $E_g=802$ мэВ $h\nu_{Re}=810 \div 815$ и $h\nu_0=806$ мэВ].

В легированном и нелегированном материалах величины полуширин полос излучения $(\Delta/2)_{Re}$ и $(\Delta/2)_0$ оказываются сравнимыми, что, по-видимому, свидетельствует о большей структурной упорядоченности легированного материала [действительно, $(\Delta/2)_{Re}=18 \div 30$ при $n=(0.8 \div 3) \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $(\Delta/2)_0=22 \div 27$ мэВ при $0.5 \cdot 10^{17} \leq n < 10^{17}$ см⁻³ для 77 К].

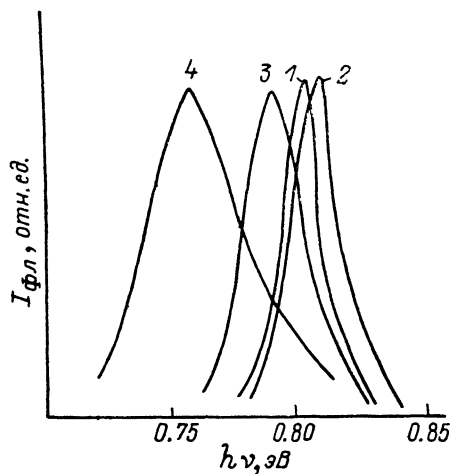


Рис. 1. Спектры ФЛ нелегированного (1) и легированных Re ЭС (2, 3) InGaAs при 77 и 300 К (4).

Ориентация: 1 — (111) А, 2 — (111) А и (100), 3 — (111) В. $n \cdot 10^{-16}$, см⁻³: 1 — 6; 2, 3 — 8.

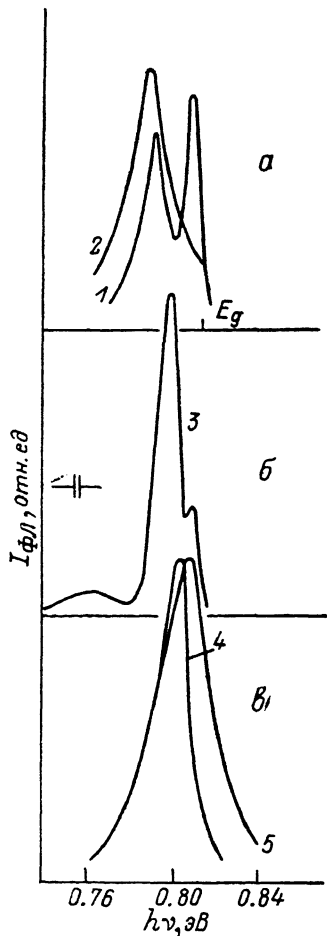


Рис. 2. Спектры ФЛ нелегированного (а) и легированных Re ЭС InGaAs (б, 3) при 1.6 К.

Ориентация: 1, 3 — (111) А, 2, 5 — (111) В, 4 — (100). $n \cdot 10^{-17}$, см⁻³: 3 — 0.8; 4, 5 — 3.

Подтверждением структурного совершенства слоев, легированных рением, являются некоторые особенности их люминесценции. «Рениевые» слои имели на порядок большую интенсивность ФЛ, чем нелегированные, кроме того, для ЭС (111)А, легированных Re, при 77 К наблюдалось сужение полос ФЛ от 30 до 15 мэВ при увеличении мощности оптической накачки от 1 до 10^3 Вт/см² (для нелегированных слоев эффект сужения не наблюдался).

Здесь интересно отметить различие люминесцентных свойств нелегированных и легированных Re слоев InGaAs ориентации (111)В при 77 и 1.6 К. Так, если для нелегированных ЭС InGaAs (111)В в спектре ФЛ основной является примесная полоса излучения с $h\nu_{max}=790$ мэВ, то для легированных рением ЭС (111)В наблюдается лишь крайевая полоса с $h\nu_{max}=820$ мэВ, $(\Delta/2)_{Re}=30 \div 40$ мэВ при $n \sim 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (рис. 1, 2, кривая 5).

В спектрах низкотемпературной ФЛ ($T=1.6$ К) слоев с минимальным содержанием рения $n=8 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и ориентациями (111)А и (100) доминирует полоса с $h\nu_{\text{Re}}=796$ мэВ (рис. 2, кривая 3), которая может быть связана с донорно-акцепторными переходами, что подтверждается характером изменения ее положения и интенсивности при возрастании уровня возбуждения. Кроме того, в спектре ФЛ имеется фоновое повторение полосы с $E_{DA}-LO=32$ мэВ. Используя соотношение $h\nu_{\text{Re}}=E_g-(E_D+E_A)+(e^2/\epsilon r)$ и значения $E_g=813$, $E_A=13$ мэВ, для уровня углерода $\epsilon=13.7$ и $e^2/\epsilon r=2$ мэВ получаем $E_D=2$ мэВ (r — расстояние между парами). На коротковолновом склоне рассматриваемой полосы выделяется либо плечо, либо максимум с $h\nu_{\text{max}}=809$ мэВ, идентичные, по-видимому, полосе, обусловленной аннигиляцией экситонов [1, 3]. Эта полоса с $\Delta/2=8$ мэВ доминирует в спектрах ФЛ наиболее чистых нелегированных образцов на стороне (111)А (рис. 2, кривая 1). Уширение экситонной полосы в данном случае, как и в работе [1], вызывается, очевидно, флуктуациями состава твердого раствора [8].

Для слоев с большим содержанием рения [$n=(1 \div 3) \cdot 10^{17}$ см⁻³] спектр ФЛ при 4.2 К состоит из одной полосы излучения с $h\nu=800 \div 802$ мэВ, соответствующей излучательным переходам c -зона—акцептор, так как при данных концентрациях материал является сильно вырожденным: экситонная полоса в этих спектрах отсутствует (рис. 2, кривая 4).

Обсуждение результатов

Можно предположить, что атомы рения в твердом растворе InGaAs создают глубокие локальные состояния подобно другим переходным элементам в $A^{II}B^{IV}$. Однако глубокие энергетических уровней рения в InGaAs в спектральном интервале 0.8–0.62 эВ обнаружено не было. Далее, значение подвижности $\mu_{\text{Re}}=(6 \div 8) \cdot 10^3$ см²/В·с при $n=(1 \div 3) \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $T=300$ К, а также уменьшенные степени компенсации в легированных слоях свидетельствуют не в пользу представления атома рения в качестве примеси, создающей заметную концентрацию глубоких центров в InGaAs.

В результате анализа низкотемпературных спектров ФЛ отмечена большая интенсивность люминесценции «рениевых» ЭС по сравнению с интенсивностью нелегированных слоев. Так, в спектрах ФЛ слоев InGaAs с минимальным легированием ($n=8 \cdot 10^{16}$ см⁻³) наблюдается Д—А полоса с $h\nu_{\text{max}}=796$ мэВ, соответствующая электронным переходам на уровень углерода, вместо Д—А полосы с $h\nu_{\text{max}}=790$ мэВ, связанной с уровнем Zn фоновой примеси, наблюдавшейся нами в нелегированном материале данных ЭС и в работе [1] (рис. 2, кривая 1). Таким образом, выявлена способность рения изменять тип донорно-акцепторного перехода в твердом растворе InGaAs за счет изменения концентрации некоторых фоновых примесей вследствие изменения их энергии связи в процессе кристаллизации слоя из раствора-расплава, содержащего Re, что для примесей Sn, Zn, Fe было показано нами ранее [9]. Уменьшение же содержания Sn и Zn в материале, по данным работы [10], улучшает его излучательные свойства.

Возможен еще один вариант присутствия рения в твердой фазе раствора InGaAs. Можно предположить, что рений отдает на связь три электрона $\text{Re } 5d^5 6s^2$, так как в поле кристаллической решетки зарядовое состояние иона создается не только $6s$ -, но и $5d$ -оболочкой, и выступает как многозарядный ион. Тогда узельные атомы Re могли бы действовать в InGaAs как изовалентная примесь, уменьшающая «фон», связанный с точечными дефектами. Однако, в связи с тем что концентрация свободных электронов слабо возрастает с увеличением содержания Re в жидкой фазе, отсутствует сдвиг максимума экситонной полосы, а также существует возможность изменения спектра экситона в случае легирования материала ИВП [11], приведенную выше модель нельзя признать вполне обоснованной.

Итак, отмеченное улучшение свойств ЭС InGaAs при легировании их рением может быть результатом химической активности рения и его влияния как модифицирующей примеси на процесс кристаллизации слоев.

Таким образом, из приведенных данных следует, что Re в InGaAs не является полным аналогом ни редкоземельных элементов, ни ИВП. Однако при легировании Re InGaAs улучшаются свойства твердого раствора, а именно увеличивается подвижность носителей, снижается степень компенсации и увеличивается интенсивность фотолюминесценции.

Авторы весьма признательны Ж. И. Алфёрову за постоянное внимание и интерес к работе и выражают благодарность Н. Д. Потехиной, Т. А. Полянской, И. Н. Ясевич за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Goetz K. H., Bimberg D., Jurgensen H., Selderer J., Solomonov V., Glinski G., Ruzeghi F. M. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 8. P. 4543—4552.
- [2] Pallab K., Bhattacharga A. et al. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 9. P. 5096—5102.
- [3] Swaminathan V., Stall R. A., Macrander A. T., Wunder J. J. // J. Vac. Sci. Techn. B. 1985. V. 3. N 6. P. 1361—1636.
- [4] Лариков С. И., Петров А. Н., Рычкова О. В., Юнович А. Э. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 6. С. 328—331.
- [5] Баженов В. К., Фистуль В. И. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1345—1362.
- [6] Омеляновский Э. М., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 192 с.
- [7] Гасанли Ш. М., Емельяненко О. В., Ергаков В. К., Кесаманлы Ф. В., Лагунова Т. С., Наследов Д. Н. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 10. С. 1588—1901.
- [8] Петросян С. Г., Чалдышев В. В., Шик А. Я. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1565—1572.
- [9] Андреев В. М., Зимогорова Н. С., Карлина Л. Б. // Полупроводники и гетеропереходы. Таллин, 1987. С. 14—17.
- [10] Гореленок А. Т., Груздов В. Г., Тарасов И. С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 10. С. 2047—2049.
- [11] Пихтин А. Н. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 3. С. 425—450.

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

Получена 24.11.1987
Принята к печати 28.11.1988