

06.2;12

©1993

ЭФФЕКТЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ И КЛАСТЕРИРОВАНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ЖЕЛЕЗА

*Е.В.Соловьева, М.Г.Мильвидский, Л.М.Долгинов,
А.Н.Осипова, В.М.Новикова*

Ранее нами сообщалось о влиянии эффектов упорядочения и кластерирования на физические свойства нелегированных эпитаксиальных слоев (ЭС) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенных методом жидкофазовой эпитаксии на подложках InP [1,2]. В частности, экспериментальное значение термической ширины запрещенной зоны для ЭС составило 0.6 эВ, что более чем на 100 мэВ ниже теоретического значения этой величины для данного состава твердого раствора. Такой сдвиг ширины запрещенной зоны (E_g) к более низким энергиям предсказывается расчетами зонных состояний в многокомпонентных твердых растворах при переходе от разупорядоченного состояния к упорядоченному [3]. Специфические аномалии наблюдались в спектрах фотопроводимости, фоновом спектре, а также в механизме рассеяния электронов. При этом была отмечена существенная зависимость наблюдаемых аномалий в физических свойствах ЭС от температуры эпитаксии в интервале 750–550°C.

В настоящей работе изучено влияние легирования ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ железом на электрофизические свойства слоев. Легирование железом широко используется на практике при создании быстродействующих $p-i-n$ фотодиодов, фотодиодов на основе структур типа металл-полупроводник-металл, а также при наращивании мезаполосковых лазерных структур. ЭС выращивались методом ЖФЭ на полуизолирующих ($\rho \sim 10^7$ Ом·см) подложках фосфида индия, ориентированных по плоскости (100). Температура эпитаксии (650°C) соответствовала "критической" температуре роста, при которой указанные выше аномалии имеют экстремальную величину. Примесь железа вводилась в расплав в количестве $(0.1-1) \cdot 10^{-2}\%$ ат. Полученные ЭС толщиной 3–6 мкм были, как правило, высокоомными ($10^2-2.8 \cdot 10^3$ Ом·см), имели электронный или дырочный тип проводимости. Концентрация носителей заряда в них составляла $n, p \sim (5 \cdot 10^{11}-10^{13}) \text{ см}^{-3}$ при $T = 300$ К. По данным

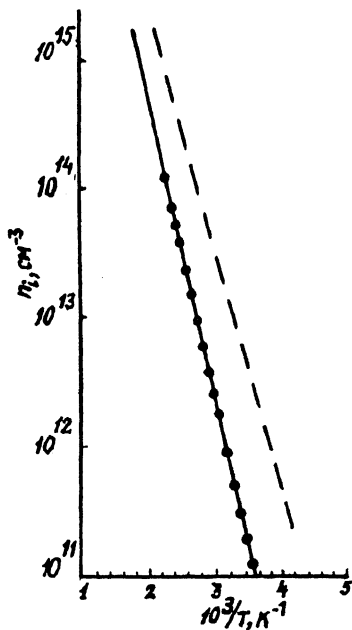


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации собственных носителей заряда в ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.

Сплошная линия — теория для $\Delta E_g = 0.74$ эВ, $m_e^* = 0.034m_0$, $m_n^* = 0.4m_0$; пунктирная линия — эксперимент для нелегированных ЭС [1]; точки — эксперимент для ЭС, содержащих Fe.

масспектрометрии вторичных ионов, концентрация железа в ЭС находилась на уровне, не превышающем 10^{15} см^{-3} . Нелегированные ЭС, выращенные в идентичных условиях, имели n -тип проводимости и концентрацию электронов $n \leq 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Температурная зависимость концентрации носителей заряда в низкоомных слоях $n, p \sim (10^{13} - 10^{15}) \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$ имела экспоненциальный характер, указывающий на присутствие в слоях глубоких центров с уровнями энергии $(E_c - 0.27) \text{ эВ}$ и $(E_v - 0.31) \text{ эВ}$, что может быть связано с присутствием железа в твердом растворе [4]. Не останавливаясь здесь на представляющих несомненный интерес вопросах, связанных с механизмом компенсации в таких слоях, рассмотрим более подробно свойства наиболее высокоомных слоев, с которыми в значительной степени и связано перспективное применение материала, легированного железом.

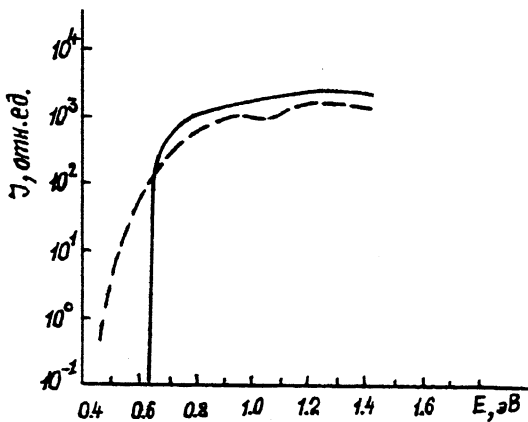


Рис. 2. Экспериментальная спектральная зависимость фотопроводимости в ЭС $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$.

Сплошная линия — ЭС, легированные Fe; пунктирная линия — нелегированные ЭС [1].

Температурная зависимость концентрации носителей заряда в высокоомных ЭС n -типа проводимости с концентрацией электронов $(5-6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$ приведена на рис. 1. Там же представлены расчетные значения концентрации собственных электронов, полученные для соответствующих данному составу твердого раствора значений $E_g = 0.74 \text{ эВ}$, $m_n^*/m_0 = 0.4$, $m_e^*/m_0 = 0.034$ [5]. Налицо хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных. На том же рисунке представлены данные для нелегированных ЭС, полученных в аналогичных условиях. Легирование железа привело к полному устранению аномалий в значениях E_g^* .

На рис. 2 приведены спектры фотопроводимости в легированных и нелегированных ЭС. В легированных слоях отсутствует fotocувствительность в длинноволновой области спектра за краем собственного поглощения в диапазоне энергий $0.5-0.6 \text{ эВ}$, характерная для нелегированных слоев. Не обнаруживается в них и наблюдаемое в нелегированных ЭС возрастание fotocувствительности в интервале $0.9-1.05 \text{ эВ}$. Таким образом, легирование железом привело к полному устранению аномалий, наблюдавшихся нами в нелегированных ЭС и обусловленных проявлением эффектов упорядочения и кластерирования.

Аномально низкие значения ширины запрещенной зоны, приписываемые эффекту упорядочения, наблюдались и в $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ и в $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$, выращенных

методом МОС-гидридной эпитаксии [6]. При этом в процессах последующих термообработок в атмосфере паров фосфора без и с диффузией цинка, проводимых при температурах ниже температуры эпитаксиального роста, авторы наблюдали разупорядочение твердых растворов, сопровождаемое возрастанием ширины запрещенной зоны до нормальных значений, характерных для изученных составов твердых растворов. При этом присутствие в ЭС примеси цинка во много раз увеличивало скорость разупорядочения. На основании этих данных авторы сделали вывод о том, что термодинамически более стабильным при низких температурах является разупорядоченное состояние исследованных твердых растворов.

В то же время в ряде работ (на это указывают также и наши результаты) [2,7] высказывается противоположная точка зрения, обосновывающая протекание в твердых растворах фазовых превращений при температурах ниже некоторого критического значения, приводящих к упорядочению и кластерированию. Основной движущей силой таких фазовых превращений является энергия упругой деформации, обусловленная различием периодов кристаллических решеток бинарных соединений, входящих в многокомпонентный твердый раствор. В частности, кластерирование, скорее всего, обусловлено спинодальным распадом, протекающим непосредственно на поверхности фронта кристаллизации (поверхностный спинодальный распад). Исходя из этого, можно предположить, что столь сильное влияние малых добавок железа на свойства ЭС связано, скорее всего, с его поверхностной активностью, приводящей к структурным перестройкам (нарушение структуры ближнего порядка) в граничном с фронтом кристаллизации достаточно тонком слое расплава (модифицирующее воздействие), затрудняющим поверхностный спинодальный распад. Не исключено также замедляющее влияние атомов железа на скорость миграции атомов кристаллизующегося твердого раствора на ростовой поверхности. Однако упомянутые выше результаты, полученные в [6], свидетельствуют, по-видимому, о том, что существуют и другие механизмы воздействия на переходы типа порядок-беспорядок.

Список литературы

- [1] Виноградова Г.И., Гогаладзе Д.Т., Долгинов Л.М., Малькова Н.В., Мильевский М.Г., Соловьева Е.В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1177-1181.
- [2] Соловьева Е.В., Мильевский М.Г., Белогорохов А.И., Виноградова Г.И., Гогаладзе Д.Т., Долгинов Л.М., Малькова Н.В., Новикова В.М., Осипова А.Н. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 6. С. 965-969.
- [3] Zunger A. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. N 3. P. 164-166.

- [4] *Clawson A.R., Millin D.P., Elder D.I.* // *J. Cryst. Growth.* 1983. V. 64. N 1. P. 90-95.
- [5] *Brendecke H., Störmer H.L., Nelson R.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1979. V. 35. N 10. P. 772-774.
- [6] *Gabrilovic P., Dabkowski F.P., Mechan K., Williams J.E., Stutius W., Hsieh J.J., Hobonyok N., Shahid M.A., Mahajan S.* // *J. Cryst. Growth.* 1988. V. 93. N 1/4. P. 426-433.
- [7] *Srivastava G.P., Martins J.L., Zunger A.* // *Phys. Rev.* 1985. V. 31. N 12. P. 2561-2565.

Государственный
научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Поступило в Редакцию
23 июля 1993 г.
