

05.1; 06.2; 06.3; 12

©1994

ЯВЛЕНИЕ ВНЕШНИХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СПЕКТР ДЛИННОВОЛНОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

*Е.В. Соловьева, М.Г. Мильвидский, В.А. Кусиков,
А.Н. Осипова, А.И. Белогорохов*

Эпитаксиальные структуры тройных и четверных твердых растворов на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ находят все более широкое применение в твердотельной СВЧ и оптоэлектронике. Новые области применения требуют достижения предельно высоких физических параметров в рабочих областях приборных структур, что накладывает исключительно жесткие требования на структурное совершенство используемых эпитаксиальных композиций.

Как показывают термодинамические работы, для большинства тройных и четверных твердых растворов соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ характерно наличие на фазовой диаграмме области несмешиваемости, что вызывает их расслаивание. Кроме того, в ряде таких твердых растворов отмечено проявление эффекта упорядочения. В результате при определенных температурах и составах в эпитаксиальных слоях многокомпонентных твердых растворов возникают специфические микронеоднородности, связанные с кластерированием и модуляциями состава, оказывающие существенное влияние на фундаментальные свойства материала. Движущей силой проявления такой нестабильности в твердых растворах является энергия упругой деформации, обусловленная различием периодов решеток бинарных соединений, составляющих данный многокомпонентный твердый раствор.

Наличие такого рода микронеоднородностей в твердых растворах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и других было зафиксировано методом рентгеновской топографии и электронной микроскопии [1,2]. Как было показано [3,4], для изучения тонких эффектов, связанных с расслаиванием и упорядочением твердого раствора, могут быть успешно использованы характеристики оптических длинноволновых ТО фононов, полученные с помощью отражательной оптической спектроскопии, поскольку они чрезвычайно чувствительны к характеру распределения атомов в полупроводниковых растворах, ибо частота и сила гармонических осцил-

ляторов отражают упругие напряжения, аккумулярованные на межатомных связях.

Источником упругих напряжений в гетероструктурах могут быть как "внутренние" напряжения, связанные с различием периодов решеток бинарных соединений, составляющих твердый раствор, так и "внешние" напряжения, обусловленные рассогласованием периодов решетки многокомпонентного эпитаксиального слоя (ЭС) и бинарной подложки, так называемые напряжения несоответствия.

В [3,4] мы изучали фоновый спектр и влияние на него температуры эпитаксии в изопериодных гетероструктурах $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ в условиях минимальных "внешних" упругих напряжений, когда рассогласование периодов решеток подложки и ЭС $\left| \frac{\Delta a}{a} \right|$ было менее $1 \cdot 10^{-3}$ (здесь Δa является разницей периодов решетки подложки и ЭС).

В настоящей работе мы использовали отражательную спектроскопию для изучения влияния на фотонный спектр "внешних" напряжений в структурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ с $\left| \frac{\Delta a}{a} \right|$ более $1 \cdot 10^3$.

Величина несоответствия периодов кристаллических решеток подложка — ЭС контролировалась по стандартной методике на двухкристальном спектрометре (конструкции Института кристаллографии РАН) с использованием для монохроматизации и коллимации первичного пучка отражения (004) $\text{CuK}\alpha_1$ от совершенного монокристалла германия с ориентацией (001), настроенном на дифракционной схеме Брэгг-Брэгг (004-004). Из дифракционных топограмм следовало, что исследуемые слои являлись когерентными. Методика исследования и расчета характеристик ТО фононов из данных отражательной спектроскопии была аналогична изложенным в [4,5].

ЭС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ были получены на высокоомных подложках InP , ориентированных по плоскости (100) методом жидкофазовой эпитаксии. Исследовали две серии ЭС, отличающихся температурой эпитаксии: 750 и 650°C. Толщина ЭС составляла (2-7.7) мкм.

Состав ЭС контролировался методом электроннозондового анализа и по длине волны краевого излучения.

Величина концентрации носителей заряда в ЭС (п.р. 10^{17} см^{-3}) исключала плазмофонное взаимодействие при температурах исследования оптических свойств 77 и 300 К.

Параметр несоответствия в ЭС менялся при температуре 300 К от $(+1.73 \cdot 10^{-3})$ до $(-1.11 \cdot 10^{-3})$. Расчет Δa при температуре эпитаксии проводился согласно [6].

Результаты измерения частот ТО фононов (частот осцилляторов InAs и GaAs) в зависимости от величины несо-

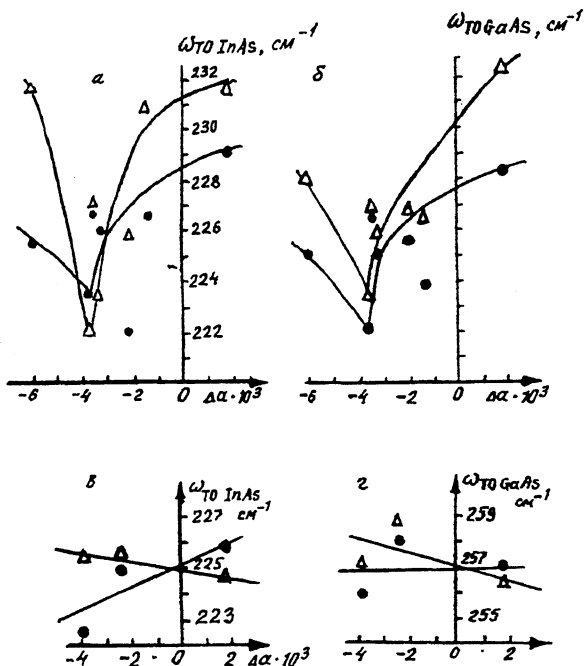


Рис. 1. Зависимость частот ТО фононов от Δa при температуре роста.

a, б — $T_p = 650^\circ\text{C}$; *в, г* — $T_p = 750^\circ\text{C}$. \bullet — $T_{изм} = \pm 300 \text{ K}$, Δ — $T_{изм} = 78 \text{ K}$.

ответствия при температуре роста для ЭС двух серий приведены на рис. 1.

Очевидно, что эти зависимости существенно отличаются друг от друга: в первой группе ЭС, выращенных при $T_p = 750^\circ\text{C}$, частоты фононов слабо зависят от Δa при температуре роста; во второй серии ЭС, выращенных при $T_p = 650^\circ\text{C}$, наблюдается четко выраженная экстремальная зависимость. Это говорит о том, что напряжения на межатомных связях в ЭС этих двух серий различны. Как следует из результатов [4], в исследованных ЭС при $T_p = 750^\circ\text{C}$ имеет место распределение компонент твердого раствора в кристаллической решетке, близкое к статистическому.

В результате этого "внутренние" напряжения (из-за различия периодов решетки InAs и GaAs) превосходят "внешние" напряжения, возникающие на гетерогранице. Вследствие этого не происходит существенного изменения частот

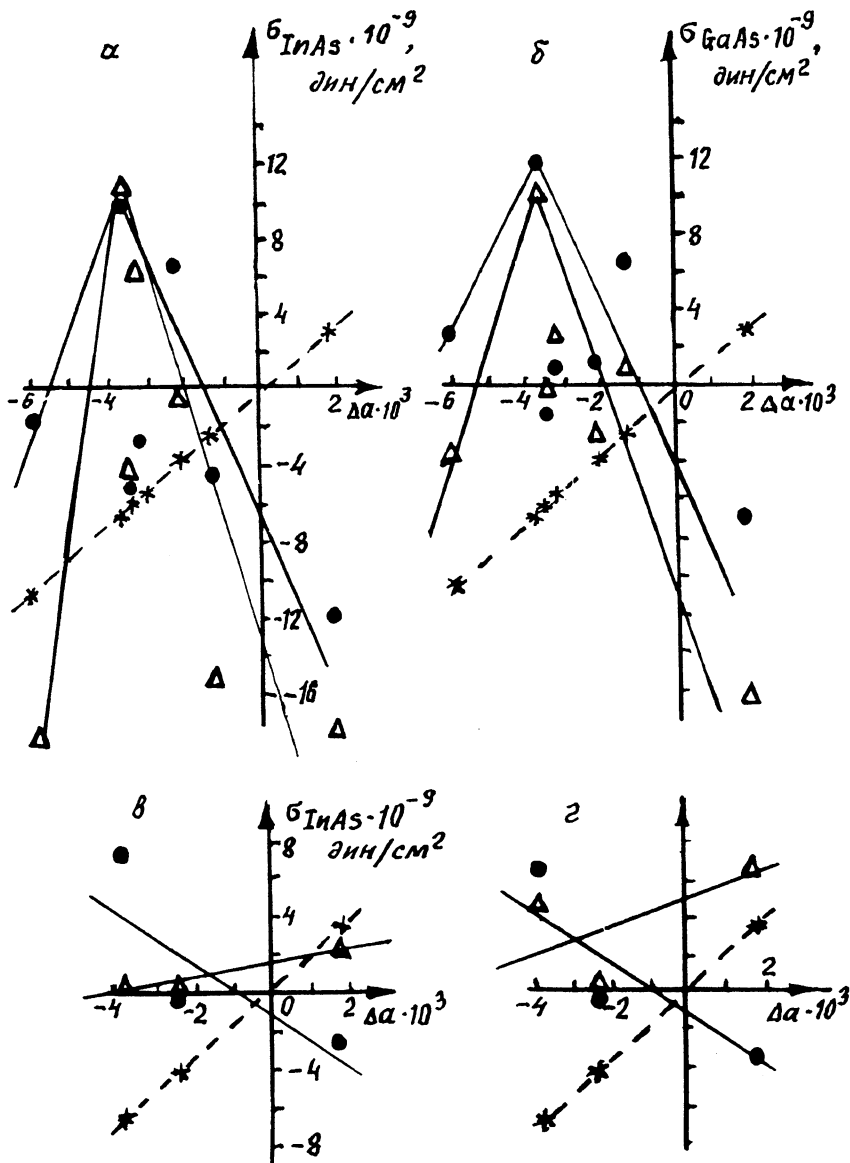


Рис. 2. Зависимость напряжений на связях от величины рассогласования Δa при температуре роста.

a, b — $T_p = 650^\circ \text{C}$; ν, ζ — $T_p = 750^\circ \text{C}$. \bullet — $T_{\text{изм}} = 300 \text{ K}$, Δ — $T_{\text{изм}} = 78 \text{ K}$. Пунктирные кривые — $6\Delta a$ — теоретическое при температуре роста, сплошные — экспериментальные значения.

фононов в ЭС первой группы при изменении величины Δa в исследованных пределах.

Появление сильной зависимости частот фононов от внешних напряжений в ЭС второй серии ($T_p = 650^\circ\text{C}$) также может быть понято в свете результатов, полученных в [4]. По-видимому, в этих ЭС из-за проявления эффектов кластерирования и упорядочения, "внутренние" напряжения оказываются в значительной степени срелаксированными. Однако если бы в ЭС второй серии действовали в основном только напряжения несоответствия на гетерогранице подложка-слой, то зависимость частот ТО фононов от Δa была бы монотонной, так как эти упругие напряжения линейно меняются с изменением величины несоответствия в исследованных нами пределах. В то же время как следует из рис. 2 (где представлено изменение напряжений на связях InAs и GaAs, вычисленное из экспериментальных данных с учетом изменения частот фононов, при варьировании температуры роста и параметра несогласования) зависимость эта для ЭС, выращенных при 650°C , также носит экстремальный характер. За точку отсчета в данном случае были выбраны частоты ТО фононов в ЭС, выращенных при температуре роста 750°C с наименьшим несогласованием $\frac{\Delta a}{a} = -2 \cdot 10^{-4}$. Подчеркнем, что эти значения частот (для InAs 225 см^{-1} и для GaAs 258 см^{-1} при $T = 300 \text{ K}$) близки к теоретическим значениям частот, вытекающим из усовершенствованной модели ячеечных однородных смещений. На рис. 2 приводятся также значения напряжений несоответствия на гетерогранице подложка-слой.

Видимо, в ЭС, полученных при $T_p = 650^\circ\text{C}$, в которых отсутствует статистическое распределение компонент и проявляются эффекты расслаивания и упорядочения, и по некоторым данным, имеет место достаточно сложная слоисто-столбчатая структура либо квазипериодическая сверхструктура [7], следует учитывать и напряжения, возникшие внутри ЭС вследствие появления специфических микрофлуктуаций состава твердого раствора. Зависимость частот фононов от величины несоответствия на гетерогранице указывает также на связь величины и характера микрофлуктуаций состава твердого раствора с величиной несогласования периодов решетки подложки и ЭС.

Список литературы

- [1] Norman A.G., Booker G.R. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 10. P. 4715-4720.
- [2] Suzuki I., Gomyo A., Jijima S., Kobayashi K., Kawata S., Hino J., Yuasa T. // Jap. J. of Appl. Phys. 1988. V. 27. N 11. P. 2098-2106.
- [3] Соловьева Е.В., Гоголадзе Д.Т., Белогорохов А.И., Долгинов Л.М., Мильвидский М.Г. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 7. С. 21-24.

- [4] Соловьева Е.В., Мильвидский 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.
- [5] Зингер Г.М., Ипатова И.П., Рыскин А.Н. // ФТП, 1984. Т. 18. В. 1, С. 24-42.
- [6] Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников. М., 1985. 159 с.
- [7] Chu S.N.G., Nakahara S., Strege K.E., Jonston W.D. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 10. P. 4610-4615.

Поступило в Редакцию
26 мая 1994 г.
