

01; 06.2

© 1991

ОСОБЕННОСТИ ФОНОННОГО СПЕКТРА
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $In_xGa_{1-x}As$ Е.В. Соловьева, Д.Т. Гоголадзе,
А.Н. Белогорохов, А.М. Долгинов,
М.Г. Мильвидский

Эпитаксиальные слои (ЭС) полупроводникового твердого раствора $In_xGa_{1-x}As$ обладают набором физических свойств, которые делают их весьма привлекательными для ряда важных практических применений.

Особое место в этой системе занимает изопериодная гетерокомпозиция $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$, обеспечивающая получение ЭС с минимальными напряжениями несоответствия на гетерогранице. Однако периоды кристаллических решеток бинарных соединений $InAs$ и $GaAs$, образующих данный твердый раствор, отличаются почти на 7%.

Это является причиной существования в данном твердом растворе значительной внутренней упругой энергии, являющейся существенной составляющей энтальпией смешения. В этих условиях в твердом растворе имеет место протекание понижающих упругую энергию системы фазовых превращений, приводящих либо к упорядочению кристаллической решетки, либо к кластерообразованию [1, 2]. Такого рода превращения должны протекать непосредственно в процессе эпитаксиального наращивания. При этом следует ожидать зависимости фундаментальных свойств материала от тепловых условий роста.

В настоящей работе это продемонстрировано на примере изучения закономерностей изменения в $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ фононного спектра, являющегося весьма чувствительной функцией характера распределения атомов в кристаллической решетке и сил взаимодействия между ними.

Исследование ЭС $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ были получены методом жидкофазовой эпитаксии на высокоомных подложках InP , ориентированных в плоскости (100). Температура роста варьировалась в интервале $T_p = (750-550)^\circ C$. Постоянство состава слоев контролировалось методом электронно зондового спектрального анализа и по длине волны излучения. Величина несоответствия периодов решетки подложки и слоя ($\frac{\Delta a}{a}$) не превышала $1 \cdot 10^{-3}$. Толщина слоев составляла (2.5-13) мкм. Концентрация носителей заряда в ЭС была ниже $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для изучения спектра оптических фононов использовалась спектроскопия инфракрасного отражения.

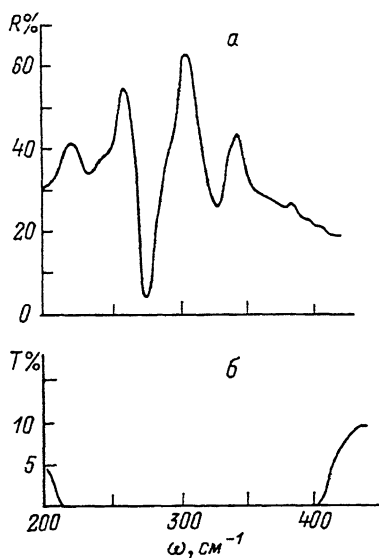


Рис. 1. Спектры пропускания (а) и отражения (б) в ЭС $I_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$.

Спектры отражения и пропускания регистрировались на быстро-сканирующем Фурье-спектрометре $IFS-113V$ (Брукер) в диапазоне волновых чисел (20–1000) cm^{-1} при $T=300 K$ с разрешением во всем интервале длин волн не менее $1 cm^{-1}$.

Типичные спектры пропускания и отражения изученной гетерокомпозиции приведены на рис. 1. Оптические спектры состоят из трех решеточных полос, что соответствует числу „элементарных ячеек“ в гетероком-

позиции: две полосы (225 и 260 cm^{-1}) соответственно для ячеек $In-As$ и $Ga-As$, являются результатом двухмодового поведения твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ при $x > 0.25$ [3], третья полоса при 305 cm^{-1} обусловлена подложкой. Интерпретация спектров проводилась с позиции осцилляторной модели, учитывающей наличие набора эффективных осцилляторов, дающих вклад в диэлектрическую проницаемость. Параметры системы, т.е. характеристики осцилляторов (частота ТО-фононов, сила осцилляторов и параметр затухания) выбирались из условия наилучшего согласия расчетов с экспериментом с учетом возможной интерференции [4].

Оказалось, что частоты ТО-фононов в твердом растворе, полученные из спектров отражения, немонотонно меняются с температурой роста ЭС (рис. 2).

При понижении температуры роста от 750°C частота ω_{InAs}^{TO} в ЭС растет, достигает максимального значения при 650°C и при дальнейшем снижении температуры выращивания падает. Напротив, частота ω_{GaAs}^{TO} в ЭС, выращенных при 650°C, минимальна.

Только в ЭС с $T_p=750^\circ C$ значения частот $\omega_{InAs}^{TO}=225 cm^{-1}$ и $\omega_{GaAs}^{TO}=258 cm^{-1}$ удовлетворительно согласуются с частотами фононов (224.5 и 257 cm^{-1}), рассчитанными по усовершенствованной модели ячеечных однородных смесей для статистического распределения компонент в кристаллической решетке твердого раствора [4].

Поэтому можно предположить, что в „высокотемпературных“ ЭС ($T_p=750^\circ C$) распределение компонент наиболее близко к хаотическому. Все изменения параметров осцилляторов в ЭС, выращенных при $T_p < 750^\circ C$, определяются отклонением распределения компонент в решетке от статистического.

Отклонение от случайного распределения атомов в тройном твердом растворе $A_xB_{1-x}C$ может быть описано параметром $\beta=1-\frac{PAB}{x}$,

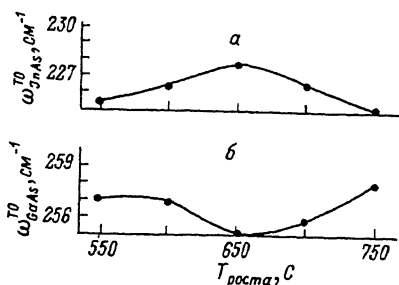


Рис. 2. Зависимость частоты ТО-фононов от температуры роста. а - ω_{InAs}^{TO} , б - ω_{GaAs}^{TO} .

где P_{AB} - вероятность того, что атом А является ближайшим соседом атома В. Если величина $\beta < 0$, в системе имеет место упорядочение. При $\beta > 0$ в системе происходит кластерирование. И упорядочение, и кластерообразование понижают величину упругой энергии твердого раствора.

В [6] показано, что при кластерировании с увеличением параметра β частота колебаний фононов ω_{InAs}^{TO} понижается, а ω_{GaAs}^{TO} возрастает. Следовательно, наблюдаемое изменение частот фононов в ЭС при $T_p > 650$ °С не связано с кластерированием.

Видимо, в этом интервале температур роста имеет место упорядочение твердого раствора. Характер изменения частот осцилляторов в ЭС говорит об изменении межатомных связей: происходит «сжатие» связи $In - As$ и «растяжение» связи $Ga - As$. Был выполнен расчет возникающих напряжений в предположении их макроскопической изотропности согласно [5]. Внутреннее давление, соответствующее сдвигу частот при изменении температуры роста до 750 до 650 °С, составляет $+6 \cdot 10^9$ дин/см² и $-9 \cdot 10^9$ дин/см² для связей $Ga - As$ и $In - As$ соответственно.

При дальнейшем понижении температуры роста $T_p < 650$ °С преобладающим становится процесс кластерообразования. На это указывает характер измерения частот ω_{InAs}^{TO} и ω_{GaAs}^{TO} в сопоставлении с расчетными данными для различных β , полученными в [6]. Кластерирование в данном случае является, скорее всего, проявлением процесса спинодального распада.

Наличие в ЭС $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ микронеоднородностей состава подтверждается данными, полученными с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии, фототермической ионизации и исследованиями электрических свойств [7-9].

Таким образом, при изменении температуры кристаллизации в интервале 750-550 °С происходит изменение характера распределения компонент твердого раствора: от хаотического (при 750°С) через упорядочение к кластерированию. Движущей силой возникаю-

щих при этом микронеоднородностей и связанных с этим микрофлуктуаций решеточного потенциала является энергия упругой деформации, обусловленная различием периодов решеток бинарных соединений, составляющих тройной раствор.

В заключение необходимо отметить, что все приведенные результаты относятся к ЭС с $\Delta a/a \leq 1 \cdot 10^{-3}$, т.е. весьма близким к изопериодным. Полученные нами предварительные результаты указывают на то, что изменение величины рассогласования периодов кристаллических решеток на гетерогранице, приводящее к изменению величины упругих напряжений несоответствия (в пределах области когерентного роста) вызывает изменение спектра ТО-фононов.

Авторы благодарят Н.В. Малькову и В.М. Новикову за выращивание ЭС и Г.И. Виноградову и А.Н. Осипову за помощь в измерениях.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Елюхин В.А., Сорокина Л.П. // ДАН СССР. Сер. Физика. 1986. Т. 287. С. 1384-1386.
- [2] Uchimura M., Sasaki A. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 11. P. 3850-3855.
- [3] Yamazaki S., Ushirokawa A., Cateda T. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 7. P. 3722-3729.
- [4] Зингер Г.М., Ипатова И.П., Рыскин А.Н. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 24-42.
- [5] Serdeira F., Ruchenaueer C.J., Pollak F.H., Candona M. // Phys. Rev. 1972. В 5. P. 580-592.
- [6] Kakimoto K., Katoda T. // Jap. J. of Appl. Phys. 1985. V. 24. N 8. P. 1022-1029.
- [7] Chu S.N.G., Nakahara S., Stregge K.E., Johnston W.D. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 10. P. 4610-4615.
- [8] Берман Л.В., Лариков С.И. // ФТП. 1985. Т.19. В. 3. С. 536-538.
- [9] Виноградова Г.И., Гогаладзе Д.Т., Долгинов А.М., Малькова Н.В., Мильвидский М.Г., Соловьева Е.В. // ФТП. Т. 23. В. 7. С. 1177-1181.

Поступило в Редакцию
26 февраля 1991 г.