

## ИНФРАКРАСНОЕ ОТРАЖЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ФОНОНЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

© А.А.Копылов, А.М.Минтаиров, А.Н.Холодилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 24 июля 1995 г. Принята к печати 2 октября 1995 г.)

Исследовалось инфракрасное отражение в области спектра  $100\text{--}400\text{ см}^{-1}$  слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.12 - 0.26$ ). Проведен анализ спектров отражения для модели «эпитаксиальный слой — полубесконечная подложка» с использованием стандартной многоосцилляторной функции диэлектрической проницаемости. Полученные частоты фононов обсуждаются в связи с возможным упорядочением кристаллической решетки твердого раствора.

Исследовалось оптическое отражение в инфракрасной области спектра слоев твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.12 - 0.26$ ). Данные измерения представляют интерес, так как могут дать информацию о возможном спонтанном упорядочении кристаллической решетки <sup>[1,2]</sup>, которое должно приводить к изменениям фононного спектра.

Исследованные слои были получены на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений (МОСГФЭ) при температурах  $580\text{--}700^\circ\text{C}$  на установке, работающей при атмосферном давлении. Состав твердого раствора измерялся методами микроанализа и рентгеновской дифракции. Исходные данные об образцах сведены в табл. 1. Спектры ИК отражения измерялись на фурье-спектрометре ЛАФС-1000 в области частот  $100\text{--}400\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2\text{--}4\text{ см}^{-1}$  при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

Примеры полученных спектров приведены на рис. 1 и 2. Анализ спектров отражения основывался на модели «эпитаксиальный слой на полубесконечной подложке» с использованием классического дисперсионного анализа. Функция диэлектрической проницаемости моделировалась набором осцилляторов, число и параметры которых ( $\omega_i$  — частоты  $TO$ -фононов,  $S$  — силы осцилляторов,  $\gamma$  — константы затухания) варьировались до получения согласия с экспериментом.

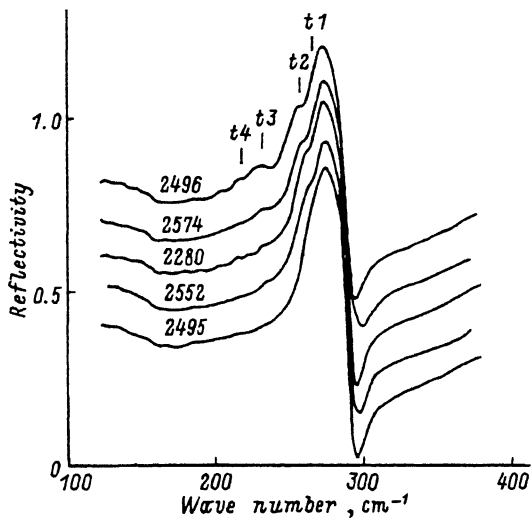


Рис. 1. Спектры оптического отражения эпитаксиальных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  при комнатной температуре. Кривые обозначены в соответствии с табл. 1. Вертикальными штрихами указаны частоты, соответствующие осцилляторам, наблюдающимся для образца 2496. Спектры, за исключением образца 2496, смещены вдоль вертикальной оси.

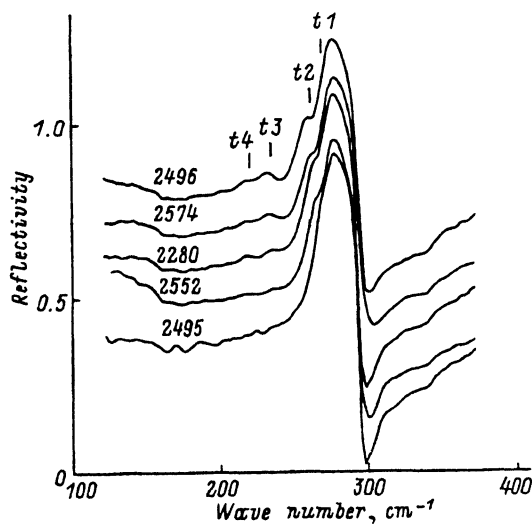


Рис. 2. Спектры оптического отражения эпитаксиальных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  при температуре жидкого азота. Обозначения аналогичны рис. 1.

Отметим, что в области выше и ниже частоты поперечного оптического фона  $\text{GaAs}$  подложки, там, где исследуемые структуры достаточно прозрачны, величина измеренного коэффициента отражения  $R$  и форма наблюдаемого спектра содержат вклад отражения от обратной стороны подложки. Для учета этого вклада измерялись спектры пропускания образцов  $T$  и вычислялась поправка к спектрам отражения

$$\delta R = R - R_\infty = T^2 R_s / (1 - R_s)^2,$$

Таблица 1. Характеристики исследованных образцов

Обозначение образца	Состав $x$	Толщина, мкм	Температура получения, °С
2280	0.26	1.1	650
2495	0.12	1.1	580
2496	0.16	1.1	700
2552	0.12	0.9	650
2574	0.12	0.9	700

Таблица 2. Результаты количественного анализа формы спектров ИК отражения при 297 К

Параметр	Образцы				
	2496	2574	2280	2552	2495
$\omega_{11}$ , см <sup>-1</sup>	265.5	267	266	267	268
$S_1$	1.65	1.36	1.49	1.14	0.84
$\omega_{12}$ , см <sup>-1</sup>	257.2	259.5	261	261.7	265.5
$S_2$	0.86	1.02	0.93	1.25	1.4
$\omega_{13}$ , см <sup>-1</sup>	231.8	232.2	235	235	—
$S_3$	0.18	0.11	0.04	0.04	—
$\omega_{14}$ , см <sup>-1</sup>	218	216.2	215	216	—
$S_4$	0.04	0.04	0.02	0.02	—

где  $R_s$  — коэффициент отражения от границы воздух-подложка,  $R_\infty$  — коэффициент отражения структуры с полубесконечной подложкой. Величина этой поправки не превышала 0.02 при комнатной температуре и 0.06 при температуре жидкого азота вблизи границ диапазона частот 200–350 см<sup>-1</sup>. Результаты моделирования сведены в табл. 2.

В предшествующей работе [3] по результатам исследования спектров комбинационного рассеяния и инфракрасного отражения твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  обсуждалось трехмодовое поведение оптических фононов. Такой характер фонового спектра связывался автоами с частичным упорядочением кристаллической решетки твердого раствора с образованием монослойной сверхрешетки  $(\text{InAs})_1(\text{GaAs})_1$  с ориентацией (100). Как следует из рис. 1 и 2, в спектрах ИК отражения, полученных в настоящей работе, устойчиво проявляется еще один тип колебаний, частота которого в зависимости от состава и условий получения материала при комнатной температуре лежит в пределах 215–218 см<sup>-1</sup>. Данное обстоятельство приводит к необходимости уточнить интерпретацию совокупности имеющихся экспериментальных данных по комбинационному рассеянию и ИК отражению.

Образование монослойной сверхрешетки приводит к появлению областей, имеющих иной фоновый спектр по сравнению с фоновым спектром кристаллической решетки неупорядоченного твердого раствора. При этом оптически активными в ИК спектрах должны быть три типа поперечных оптических фононов. Расчет с использовани-

ем обобщенной модели и соответствующих параметров для GaAs и InAs дает для фононов указанной симметрии в  $\Gamma$ -точке зоны Бриллюэна следующие значения частот,  $\text{см}^{-1}$ : 253 —  $E(\text{GaAs})$ , 221 —  $E(\text{As})$ , 77 —  $E(\text{InAs})$ . Таким образом, в спектрах отражения могут проявляться как фононы, характерные для неупорядоченного твердого раствора, так и фононы, соответствующие монослойной сверхрешетке.

В нашем случае состав твердого раствора близок к GaAs, и при образовании фазы  $(\text{InAs})_1(\text{GaAs})_1$  содержание In в неупорядоченном твердом растворе может уменьшаться вплоть до нуля. Поэтому мода  $t_1$  с частотой  $266\text{--}268\text{ см}^{-1}$  должна рассматриваться как GaAs-подобное  $TO$ -колебание кристаллической решетки неупорядоченного твердого раствора с составом, близким к GaAs. Моды  $t_2$ ,  $t_3$  и  $t_4$  в соответствии с результатами расчета фононного спектра монослойной сверхрешетки могут сопоставляться с поперечными оптическими фононами типа  $E(\text{GaAs})$  и  $E(\text{As})$ .

Для однозначной интерпретации наблюдающихся колебаний необходимо осуществить теоретическую оценку соответствующих сил осцилляторов. Анализ результатов моделирования спектров, приведенных в табл. 2, показывает, что сила осциллятора для моды  $t_2$  оказывается одного порядка с силой осциллятора для GaAs-подобной моды  $t_1$ , в то время как силы осцилляторов  $t_3$  и  $t_4$  существенно меньше. Отметим также, что изменение сил осцилляторов коррелирует скорее с условиями получения эпитаксиальных слоев, нежели с их составом, что возможно указывает на сложность структурных характеристик исследованного материала.

#### Список литературы

- [1] M.A. Shahid, S. Mahajan, D.E. Laughlin, H. Cox. Phys. Rev. Lett., **58**, 2567 (1987).
- [2] J.E. Bernard, L.G. Ferreira, S.-H. Wei, A. Zunger. Phys. Rev. B, **38**, 6338 (1988).
- [3] А.М. Минтаиров, Д.М. Мазуренко, М.А. Синицин, В.С. Явич. ФТП, **28**, 1550 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

### Infrared reflection and optical phonons in epitaxial layers of solid solutions of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

*A.A. Kopylov, A.M. Mintairov, A.N. Kholodilov*

St.Petersburg State Electrotechnical University, 197376 St.Petersburg, Russia  
A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences,  
194021 St.Petersburg Russia

Infrared reflectivity of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  epitaxial layers in the range  $100\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  has been investigated. Analysis of the reflectivity spectra has been carried out using a standard multi-oscillator dielectric function. The obtained phonon frequencies are discussed in relation to possible crystal lattice ordering.