

УДК 539.2

## УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОГО РАСТВОРА GaAlAs

С. М. Кижжарин, А. В. Царев, В. В. Пашкин, И. Б. Яковкин

Измерена дисперсия фазовой скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) в однослойных структурах GaAlAs. По результатам измерений, а также на основании закономерности, обнаруженной для соотношений упругих констант  $c_{12}/c_{11}$  и  $c_{44}/c_{11}$  соединений  $A_{III}B_V$ , определены упругие константы AlAs. При использовании линейной интерполяции упругих констант твердого раствора  $Ga_{1-x}Al_xAs$  константы AlAs имеют величины:  $c_{11}=11.63$ ,  $c_{12}=5.76$ ,  $c_{44}=5.41 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

Экспериментально определенных констант AlAs в литературе нами не обнаружено. Трудность такого определения состоит в том, что этот материал доступен обычно лишь в виде пленок твердого раствора GaAlAs, выращенных на другом кристалле, что затрудняет использование стандартных методик, основанных на исследовании объемных образцов. При определении свойств AlAs по измерениям констант  $Ga_{1-x}Al_xAs$  необходимо основываться на некоей интерполяции по  $x$ . Предложенная в [1] линейная интерполяция косвенно подтверждается экспериментальными данными [2], хотя, по-видимому, необходимо более строгое обоснование такого приближения. Авторы [1, 3-5] приводят расчетные величины упругих констант AlAs. В [6] методом рентгеновского диффузного рассеяния на тепловых фонах измерены константы  $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$ . В [2] по рассеянию Мандельштамма—Бриллюэна на поверхностных волнах в слоях GaAlAs были измерены скорости этих волн с длиной  $\sim 100$  нм. На основе данных этой работы Адати [1] оценил упругие константы AlAs на основе грубого приближения  $c_{11}=2c_{12}=2c_{44}$ . Эти данные вместе с данными [1, 3-5] приведены в табл. 1 и демонстрируют существенное различие между собой, причем наиболее значительна разница в результатах, основанных на экспериментальных работах [2, 6].

В настоящей работе измерена дисперсия поверхностных акустических волн (ПАВ) на слоистых структурах GaAlAs/GaAs и по результатам этих измерений предпринята попытка определить упругие константы AlAs.

Задачу определения трех независимых констант  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  арсенида алюминия можно существенно упростить, выявив закономерности в соотношениях упругих констант в семействе соединений  $A_{III}B_V$ . В [1] отмечена корреляция упругих констант и постоянных решетки  $A_{III}B_V$ . Однако это не дает оснований для удовлетворительного определения упругих констант. Для соединений  $A_{III}B_V$ , на наш взгляд, наблюдается другая более четкая закономерность. Рассмотрим соотношения между независимыми упругими константами соединений  $A_{III}B_V$ , имеющих струк-

Таблица 1

Упругие константы AlAs по данным [1-5]

$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$	Ссылка на литературу
$10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>			
12.02	5.70	5.89	[1]
12.5	5.34	5.42	[3]
11.5	5.51	5.25	[4], [5]
10.4	5.2	5.2	[1] по данным [2]
13.35	5.52	6.30	[6] $Ga_{0.5}Al_{0.5}As$

$A_{III}B_V$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$	Ссылка на литературу	$c_{12}/c_{11}$	$c_{44}/c_{11}$
	$10^{10}$ П/м <sup>2</sup>					
InSb	6.717	3.665	3.018	[7]	0.546	0.449
InAs	8.329	4.526	3.959	[8]	0.543	0.475
InP	10.22	5.76	4.60	[9]	0.564	0.450
GaSb	8.849	4.037	4.325	[7]	0.456	0.489
GaAs	11.90	5.38	5.95	[10]	0.452	0.500
GaP	14.124	6.367	7.033	[11]	0.451	0.498
AlSb	8.939	4.425	4.155	[7]	0.495	0.465

туру сфалерита. Сгруппируем эти константы по элементу А (табл. 2). Нет экспериментальных данных лишь по арсениду и фосфиду алюминия. Нетрудно заметить, что в каждой группе отношения  $c_{12}/c_{11}$  и  $c_{44}/c_{11}$  оказываются постоянными со средней точностью в 1.5 %, причем наилучшим образом эти отношения совпадают у материалов с наиболее надежно установленными константами (арсенид галлия и фосфид галлия). Естественно предположить, что для группы соединений алюминия эти соотношения будут такими же, как у AlSb

$$c_{11} \equiv c, \quad c_{12} = 0.495c, \quad c_{44} = 0.465c. \quad (1)$$

Единственную независимую константу  $c$  можно подобрать таким образом, чтобы набор всех констант, удовлетворяющий соотношениям (1), наилучшим образом описывал экспериментально измеренную дисперсию скорости ПАВ на слоистой структуре GaAlAs/GaAs.

Скорости акустических волн связаны с упругими константами как  $c_{\text{эф}} = \rho v^2$ , где  $c_{\text{эф}}$  — комбинация упругих констант, соответствующая данной ветви колебаний с фазовой скоростью  $v$ ;  $\rho$  — плотность кристалла. Плотность стехиометрического арсенида алюминия легко определить по известной постоянной решетки  $a_2 = 5.6611$  Å:  $\rho_2 = 3.731$  г/см<sup>3</sup>. Плотность арсенида галлия, определенная таким образом,  $\rho_1 = 5.317$  г/см<sup>3</sup> ( $a_1 = 5.6533$  Å), практически совпадает с экспериментальной  $\rho_1 = 5.316$  г/см<sup>3</sup> [12]. Постоянная решетки  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  зависит от  $x$  линейно [1]. Тогда плотность GaAlAs

$$\rho_{12} = 4(m_{\text{Ga}}(1-x) + m_{\text{Al}}x + m_{\text{As}})/(a_1(1-x) + a_2x)^3, \quad (2)$$

где  $m_{\text{Ga}}$ ,  $m_{\text{Al}}$ ,  $m_{\text{As}}$  — соответственные атомные массы и учтено, что на элементарную ячейку кристалла типа сфалерита приходится по четыре атома каждого вида. Поскольку постоянные решетки арсенида галлия и арсенида алюминия  $a_1 \approx a_2$ , предыдущее выражение можно представить в виде

$$\rho_{12} = \rho_1 - 4(m_{\text{Ga}} - m_{\text{Al}})x/a_1^3 + O(x(a_1 - a_2)/a_1). \quad (3)$$

Нелинейный член, условно записанный в виде  $O(x(a_1 - a_2)/a_1) \lesssim 0.015$  при любых  $x$ , т. е. зависимость плотности  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  от  $x$  близка к линейной; поэтому далее для плотности использована линейная интерполяция

$$\rho_{12} = 5.316 - 1.585x \text{ (г/см}^3\text{)}. \quad (4)$$

Измерение дисперсии скорости ПАВ осуществлялось на слоистых структурах, состоявших из одного слоя арсенида галлия—алюминия, выращенного жидкофазной эпитаксией на подложке из полуизолирующего арсенида галлия. Обозначения образцов, используемые в дальнейшем тексте, и их параметры приведены в табл. 3. Распределение состава

$Ga_{1-x}Al_xAs$  по глубине слоя было детально исследовано. На части образца вытягиванием из травителя был сформирован пологий скос, обнаживший срез слоя в «растянутом» виде. По срезу с шагом, соответствовавшим размеру около 0.2 мкм по толщине пленки, были измерены спектры краевой фотолюминесценции. Накачка осуществлялась сфокусированным пучком аргонового лазера, размер пучка на образце около 50 мкм. Измерения проводились при комнатной температуре. Зависимость положения пика люминесценции от состава  $x$  для  $Ga_{1-x}Al_xAs$  в области прямого минимума запрещенной зоны этого полупроводника  $0 < x < 0.4$  до недавних пор не была точно установлена. Различные авторы (например, [13-15] и др.) предлагали сильно различающиеся зависимости от  $E(x) = 1.424 + 1.50x$  у Монемара [13] до  $E(x) = 1.425 + 1.042x + 0.468x^2$  у Онтонна [15]. Лишь в недавних работах [16-18] появились совпадающие данные

$$E(x) = 1.425 + 1.35x \text{ (эВ)}, \quad 0 < x < 0.4. \quad (5)$$

Интересно, что эти измерения не подтвердили наличия сколь-нибудь заметной нелинейности зависимости  $E$  от  $x$  для  $GaAlAs$  в области прямого минимума запрещенной зоны. Выражение (5) использовано нами для определения  $x$  по энергии пика люминесценции.

На рис. 1 изображены измеренные профили  $x$  для исследованных образцов. На всех образцах замечено уменьшение доли арсенида алюминия при приближении к поверхности.

На поверхности структур методом фотолитографии были изготовлены пары встречно-штыревых преобразователей (ВШП), ориентированные вдоль  $\langle 110 \rangle$ , возбуждавшие ПАВ через собственный пьезоэффект структуры как на основной частоте (длины волн 26 и 20 мкм), так и на третьей и пятой гармониках. Скорость ПАВ определялась по измеренным частотам синхронизма, соответствующим максимальным амплитудам возбуждаемых волн. ПАВ регистрировались оптическим зондом [19]. Для исключения погрешностей, связанных с возмущениями скорости ПАВ, вносимыми наличием преобразователя ( $Al \sim 100$  нм) на поверхности структуры, те же преобразователи были изготовлены на подложке из арсенида галлия и дисперсии скорости ПАВ на структурах  $GaAlAs/GaAs$  считалась дисперсия, измеренная на слоистой структуре за вычетом дисперсии, вносимой преобразователем на подложке из арсенида галлия на соответствующей гармонике преобразователя. Скорости ПАВ на слоистых структурах были больше скорости этой волны на арсениде галлия. Измеренная разница этих скоростей в виде зависимости  $\Delta v$  (изменение скорости ПАВ, отсчитываемое от скорости ПАВ на арсениде галлия  $\langle 110 \rangle$ , (001) от  $K_z H$ , где  $K_z$  — волновой вектор ПАВ,  $H$  — толщина слоя арсенида галлия — алюминия) приведена на рис. 2. При больших  $K_z H$  кривые асимптотически приближаются к скорости ПАВ на полупространстве из  $GaAlAs$ . Положение этих точек определяется упругими свойствами слоя и слабо зависит от его толщины. При малых  $K_z H$ , напротив, положение дисперсионной кривой определяется в большей степени толщиной слоя и слабо зависит от упругих констант слоя. Таким образом, по упомянутым участкам дисперсионной кривой ( $K_z H < 1$  и  $K_z H \gg 1$ ) можно определить толщину слоя и упругие константы, связанные соотношениями (1). В качестве первого приближения были использованы толщины слоев, измеренные интерференционным микроскопом по сколу, окрашенному селективным травителем. Точность последнего метода не лучше  $\pm 0.5$  мкм. Толщины, определенные подбором величин, наилучшим образом описывающих измеренные скорости при  $K_z H < 1$  ( $\Lambda_z = 20$  и 26 мкм), приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры исследованных слоистых структур  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$

Образец	Средний состав слоя, $x$	Толщина слоя, мкм
П2	0.262	3.1
П4	0.290	3.0
П6	0.290	3.5

Для учета неоднородности слоев  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  измеренный профиль  $x$  (рис. 1) аппроксимировался десятью подслоями с постоянным составом внутри каждого подслоя. ПАВ на такой десятислойной структуре рассчитывались по программе, разработанной на основе алгоритма, предложенного в [20]. Задача подбора упругих констант, описывающих эксперимен-

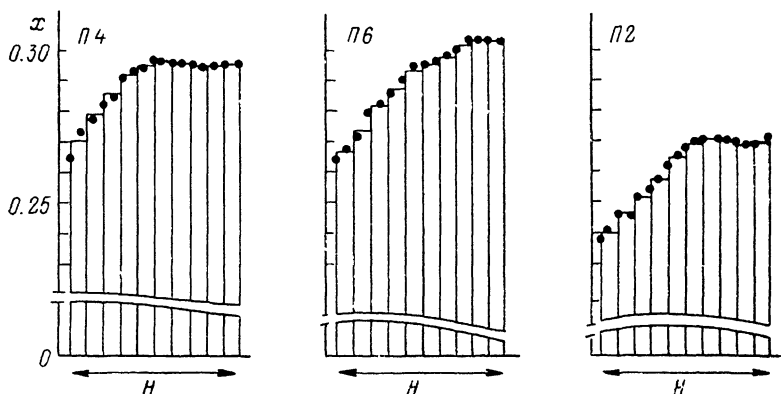


Рис. 1. Профили состава твердого раствора  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  по слою толщины  $H$  для исследованных образцов (см. табл. 3).

Величины  $x$  уменьшаются у поверхности слоистой структуры. Точки — эксперимент. Показана также десятислойная аппроксимация, использованная в расчетах.

тально измеренную дисперсию, потребовала около  $10^3$ — $10^4$  вычислений скорости ПАВ на десятислойной структуре по заданным константам. Чтобы уложить этот объем вычислений в реальное время работы ЭВМ, программа расчета была составлена для упрощенного случая: слоистая

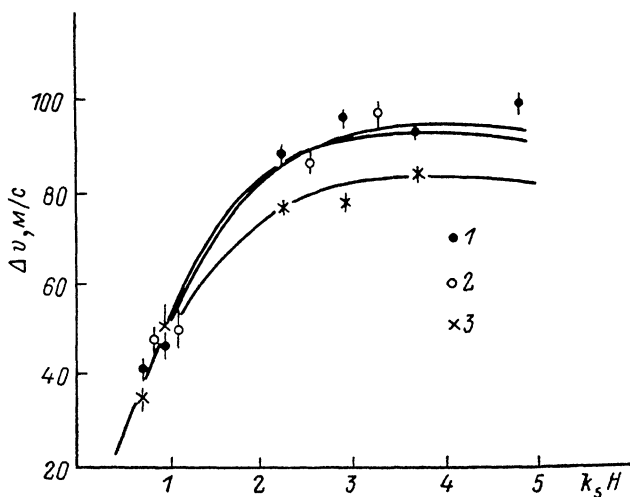


Рис. 2. Зависимость  $\Delta v$  (разность скоростей ПАВ  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ ) на  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  и  $\text{GaAs}$  от  $k_s H$ .

Точки — эксперимент для образцов П4 (1), П6 (2), П2 (3). Приведенный разброс показывает повторяемость данных. Сплошные линии — дисперсионные зависимости, минимизирующие сумму квадратов отклонений от экспериментальных данных.

структура из кубических кристаллов в фиксированной геометрии  $\langle 110 \rangle$  ( $\langle 001 \rangle$ ) в пренебрежении пьезоэффектом.

На рис. 2 сплошными линиями приведены дисперсионные кривые, соответствующие набору упругих констант арсенида алюминия, связанному соотношениями (1) и минимизирующему сумму квадратов отклонений от всех экспериментальных данных. При использовании линейной интерполяции упругих констант твердого сплава арсенида галлия—алюминия константы  $\text{AlAs}$  в единицах  $10^{10}$   $\text{H}/\text{m}^2$  равны

$$c_{11} = 11.63, \quad c_{12} = 5.76, \quad c_{44} = 5.41. \quad (6)$$

Погрешность определения констант (6) складывается из погрешности, связанной с измерениями дисперсии, и точности, с которой выдерживается соотношение (1). Последняя определялась по известным константам  $A_{III}B_V$ . Суммарная погрешность величин (6) составила 2 %. Это на порядок хуже точности, с которой известны константы арсенида галлия. Полученные упругие константы близки к величинам, предсказанным в работах [4, 5] на основе феноменологической модели Кейли—Мартина (табл. 1). Заметим, что при определении (6) использовалась линейная интерполяция, которая, как отмечалось выше, строго еще не обоснована. Таким образом, (6) можно рассматривать как эффективные упругие константы  $AlAs$ , пригодные для определения констант  $Ga_{1-x}Al_xAs$  линейной интерполяцией

$$c_{11} = 11.90 - 0.27x, \quad c_{12} = 5.33 + 0.38x, \quad c_{44} = 5.95 - 1.54x \quad (7)$$

при небольших  $x$ , по меньшей мере  $\leq 0.3$ .

В заключение авторы благодарят Г. С. Останину за изготовление ВШП, К. Д. Владимирцеву за изготовление слоистых структур, Р. М. Тазиева за помощь в составлении программы расчета, А. В. Каткова за травление образцов.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Adachi S. J. Appl. Phys., 1985, vol. 58, N 3, p. R1—R29.
- [2] Sapriel J., Michel J. C., Toledano J. C. et al. Phys. Rev. B, 1983, vol. 28, N 4, p. 2007—2016.
- [3] Wiley J. D. In: Semiconductors and Semimetals / Ed. R. K. Wilardson and A. C. Beer. Academic, N. Y., 1975, vol. 10, p. 91.
- [4] Martin R. M. Phys. Rev. B, 1970, vol. 10, N 10, p. 4005—4011.
- [5] Van Vechten J. A. Phys. Rev. B, 1974, vol. 10, N 10, p. 4222—4227.
- [6] Kashiwagura N., Kashihara Y., Harada J. Jpn. J. Appl. Phys., 1986, vol. 25, N 9, p. 1317—1322.
- [7] Bolef D. I., Menes M. J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 8, p. 1426—1427.
- [8] Gerlih D. J. Appl. Phys., 1964, vol. 35, N 10, p. 3062—3063.
- [9] Hickernell F. S., Gayton W. R. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, N 1, p. 462.
- [10] Blakmore J. S. J. Appl. Phys., 1982, vol. 53, N 10, p. R123—R181.
- [11] Гырбу И. Н. Изв. вузов. Неорг. матер., 1980, т. 16, № 7, с. 68—69.
- [12] Weisberg L. R., Blanc J. J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, p. 1002—1003.
- [13] Monemar B., Shih K. K., Petit G. D. J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, N 6, p. 2604—2613.
- [14] Casey H. C. J. Appl. Phys., 1978, vol. 49, N 7, p. 3684—3692.
- [15] Onton A. Proc. of the 10th International Conf. on the Phys. of Semicond., Cambridge, Mass., 1970, p. 107.
- [16] Miller N. C., Zemon S., Werber G. P., Powazinik W. J. Appl. Phys., 1985, vol. 57, N 2, p. 512—515.
- [17] Lambert B., Canled J., Regreny A. et al. Semicon. Sci. Technol., 1987, vol. 2, p. 491—493.
- [18] Oelgart G., Schwabe R., Heider M., Jacobs. Semicond. Sci. Technol., 1987, vol. 2, N 2, p. 468—474.
- [19] Яковкин И. Б., Петров Д. В. Дифракция света на акустических поверхностных волнах. Новосибирск: Наука, 1979. 184 с.
- [20] Ляхов Н. З., Тазиев Р. М. Деп. в ВИНТИ № 5235-84.

Институт физики полупроводников  
СО АН СССР  
Новосибирск

Поступило в Редакцию  
13 апреля 1988 г.