

УДК 539.32

*В.Н. НИКИФОРОВ**, *В.Г. СРЕДИН***, *К.Р. КУРБАНОВ******МОДУЛИ УПРУГОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Cd_xHg_{1-x}Te^1$**

Приведены результаты исследования температурных зависимостей (4,2–300 К) скоростей низкочастотного ультразвука для монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Получены значения упругих модулей и температур Дебая для различных составов твердого раствора. На основе полученных данных проведена оценка возможных напряжений на гетерогранице данных материалов с некоторыми подложками.

Ключевые слова: *твердые растворы, модули упругости, температурные зависимости.*

В 2009 г. исполнилось 50 лет с момента синтеза твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$. За это время изучению методов получения материала и его свойств, разработке приборных структур на его основе посвящены десятки тысяч работ, проведены многочисленные конференции и семинары, изданы признанные монографии, но тем не менее даже в материаловедении этого твердого раствора имеется ряд белых пятен. Одно из них – модули упругости твердого раствора. Кроме работ [1, 2], выполненных на двух составах $Cd_xHg_{1-x}Te$, другие прямые измерения его упругих свойств авторам не известны. Данная ситуация характерна и для других твердых растворов соединений A^2B^6 и объясняется, по нашему мнению, двумя обстоятельствами. Во-первых, сложностью соответствующих исследований. Для изучения упругих свойств полупроводниковых материалов традиционными акустическими методами необходимы достаточно большие и однородные по составу ориентированные монокристаллы. Точность измерений скорости ультразвука (УЗ) на уровне 10^{-4} – 10^{-5} достигается обычно на образцах толщиной и с поперечными размерами порядка сантиметра. Выращивание таких кристаллов твердых растворов представляет значительные трудности, причем неоднородность по составу неизбежна практически при любом методе роста. Во-вторых, в тех случаях, когда возникает необходимость воспользоваться значениями модулей упругости твердых растворов, для этих целей используют оценку, представляющую собой линейную экстраполяцию между значениями соответствующих модулей бинарных соединений, из которых состоит твердый раствор, что может приводить к существенным ошибкам.

В настоящей работе представлены результаты исследований скорости распространения УЗ-волн, позволивших непосредственно определить модули упругости для набора составов твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Для исследований использовались монокристаллы, выращенные методом вертикальной направленной кристаллизации с подпиткой из твердой фазы, который позволяет получать однородные по составу образцы с контролируемым уровнем остаточных собственных дефектов. Для снижения уровня дефектов кристаллы легировались на уровне 10^{14} см⁻³ примесью индия, что не отражалось на электрофизических параметрах материала. Используемые для измерений кристаллы имели форму диска или плоскопараллельной пластины размерами от 1 до 1,5 см и толщиной около 0,1 см. Нормали к плоскостям поверхности образцов и соответственно направления распространения ультразвука совпадали с одним из кристаллографических направлений [100], [110] или [111]. Разориентация относительно указанных направлений не превышала 2°. Для обеспечения плоскопараллельности поверхностей отбирались центральные участки предварительно ориентированных шлифованных и протравленных пластин большого размера (диаметром около 3 см).

Пластины указанного размера оптимально подходят для возбуждения в них УЗ-волн методом прямого преобразования электромагнитных и акустических волн в постоянном магнитном поле [3]. Для повышения эффективности электромагнитно-акустического преобразования в полупроводниковом материале на предварительно подготовленную поверхность кристалла осаждением в вакууме наносились слои алюминия толщиной порядка 1 мкм. Над слоем алюминия и образцом размещались катушки (вставка на рис. 1), одна из которых питалась напряжением высокой частоты

¹ Работа частично (**) выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК 2322).

ты. В слое алюминия наводился переменный ток j . В присутствии внешнего постоянного магнитного поля H возникает лоренцево взаимодействие с электронной подсистемой исследуемого образца, которое может быть описано уравнением для силы Ампера:

$$F_L = [j, H]/c,$$

где c – скорость света. При этом на свободные носители действует сила Лоренца. Если вектор H перпендикулярен пластине, то сила Лоренца расположена в плоскости пластины. В этом случае в пленке Al, по толщине близкой к размеру скин-слоя, возбуждаются поперечные звуковые волны, которые распространяются в объем полупроводникового кристалла. При ориентации магнитного поля H параллельно плоскости образца в нем возбуждаются продольные звуковые волны. Направление вектора скорости ультразвука при этом совпадает с одной из осей симметрии решетки полупроводника ([011] или [111]). УЗ-волна детектировалась с использованием эффекта обратного электромагнитно-акустического преобразования с помощью второй катушки прямоугольного сечения, расположенной над поверхностью образца. Образец и две катушки – первичная и вторичная – помещались в криостат с жидким гелием с регулируемой температурной камерой. Внешнее магнитное поле $H \approx 8$ Тл создавалось сверхпроводящим соленоидом. Измерения были проведены в интервале температур 4–250 К.

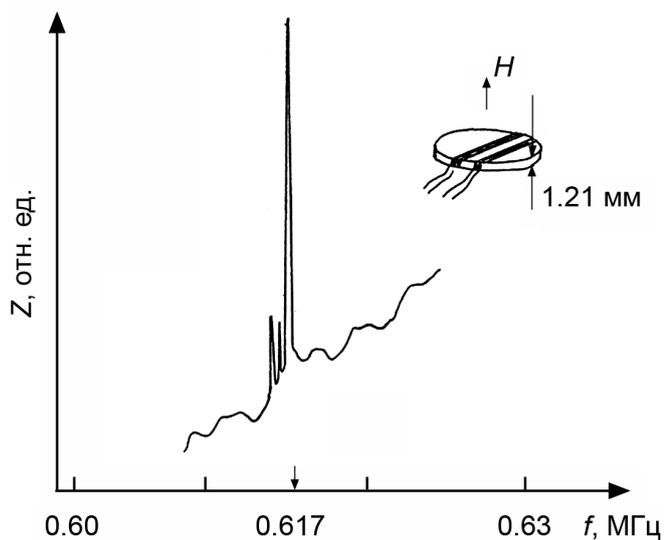


Рис. 1. Резонансная кривая для кристалла с составом $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te$ при температуре 4,2 К. На вставке представлена геометрия катушек для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний

В условиях нашего эксперимента в плоскопараллельном образце формировалась стоячая акустическая волна. Ее длина λ связана с частотой f переменного тока в скин-слое соотношением $\lambda = 2DS/f$, где S – скорость звука, D – поперечный размер пластины. При частотах, соответствующих возбуждению стоячих УЗ-волн, наблюдались резонансные изменения поверхностного полного сопротивления Z пластины. Эти изменения регистрировались стандартными радиотехническими методами. Частоты акустических резонансов Фабри – Перо в пластине определяются выражением

$$f_{l,t} = nS_{l,t}/2D, \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots,$$

где нижние индексы l и t обозначают поляризацию ультразвуковых волн – продольную и поперечную соответственно. Скорости УЗ-волн этим методом определяются с точностью 10^{-3} . Измерения были проведены в диапазоне $2,5 \cdot 10^6 - 1,5 \cdot 10^7$ с $^{-1}$ на частотах первых резонансов ($n = 1$) Фабри – Перо продольной и поперечных УЗ-волн. В ряде случаев, с целью проверки, проводились тестовые измерения на частотах следующих ($n = 3, 5$) резонансов. Типичный вид резонансной кривой представлен на рис. 1.

В работе проведены УЗ-исследования семи составов твердого раствора, причем только у трех из них ориентация поверхности соответствует направлению [110], для которого измеряются скорости распространения продольной и двух поперечных УЗ-волн, что оказывается достаточным для определения всех модулей упругой жесткости исследуемого материала C_{11}, C_{12}, C_{44} . Зависимость скоростей продольной и поперечных упругих волн от температуры для образца с составом $x = 0,21$ представлена на рис. 2. Для УЗ-волн, распространяющихся в этих направлениях, связь между измененными скоростями звука и искомыми упругими модулями дается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho S_l^2 &= (C_{11} + C_{12} + 2C_{44})/2, \\ \rho S_{t1}^2 &= (C_{11} - C_{12})/2, \\ \rho S_{t2}^2 &= C_{44}. \end{aligned} \quad (1)$$

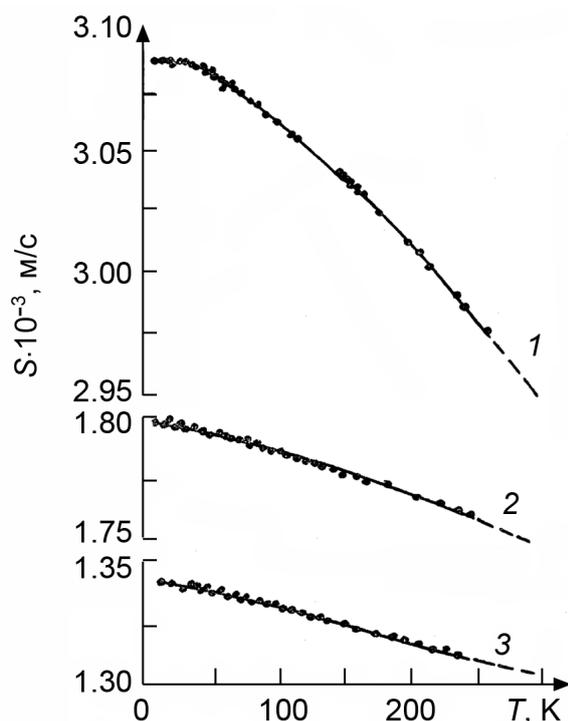


Рис. 2. Температурные зависимости скоростей продольного (кр. 1) и двух поляризаций поперечного (кр. 2, 3) ультразвука в монокристалле $\text{Cd}_{0,21}\text{Hg}_{0,79}\text{Te}$

Здесь ρ – плотность материала. В табл. 1–3 приведены значения модулей упругой жесткости исследуемых материалов C_{ij} , а также других характеристик, определяемых с их помощью: фактора анизотропии B , модуля Юнга E , коэффициента Пуассона ν , изотермического модуля всестороннего сжатия K :

$$\begin{aligned} B &= 2C_{44} / (C_{11} - C_{12}), \\ \nu &= C_{12} / (C_{11} + C_{12}), \\ E &= (C_{11}^2 - C_{12}^2) / (C_{11} + 2C_{12}), \\ K &= (C_{11} + C_{12}) / 3. \end{aligned} \quad (2)$$

Значения всех указанных параметров приведены в диапазоне температур 4–300 К, причем последнее значение получалось линейной экстраполяцией от области 150–250 К.

Приведенные результаты не позволяют построить зависимости модулей упругости твердого раствора от состава, однако их сопоставление с значениями аналогичных параметров у исходных бинарных соединений – HgTe и CdTe [6] – показывает, что линейная интерполяция между исходными значениями является для них очень грубым приближением.

В связи отсутствием прямых измерений упругих параметров исследуемого твердого раствора были предприняты меры по проверке точности и достоверности полученных результатов. С этой целью были проведены дополнительные измерения скоростей продольного и поперечного ультразвука на образцах одного и того же состава $x =$

Таблица 1

Упругие параметры $\text{Cd}_{0,11}\text{Hg}_{0,89}\text{Te}$

T, K	$C_{11} \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$C_{12} \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$C_{44} \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$B \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$\nu \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$E \cdot 10^{10}, \text{Па}$	$K \cdot 10^{10}, \text{Па}$
4	64,5	42,3	25,9	2,33	0,396	31,1	49,7
20	64,5	42,2	25,9	2,32	0,396	31,1	49,6
78	63,9	41,6	25,6	2,29	0,394	31,2	49,0
100	63,5	41,3	25,5	2,29	0,394	31,0	48,7
150	62,6	40,6	25,2	2,30	0,394	30,6	47,9
200	61,5	39,8	25,0	2,31	0,394	30,1	47,0
250	60,3	39,0	24,6	2,31	0,393	29,6	46,1
300*	59,0	38,1	24,3	2,32	0,392	29,1	45,1

0,21 с двумя различными ориентациями: [110], для которой из этих измерений с помощью (1) вычисляются все три модуля упругости, и ориентации [111]. Для этой ориентации скорости S_l и S_t связаны с упругими модулями соотношениями

$$\begin{aligned} \rho S_l^2 &= (C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}) / 3, \\ \rho S_t^2 &= (C_{11} - C_{12} + C_{44}) / 3, \end{aligned} \quad (3)$$

которые позволяют определить лишь две их линейных комбинации. Определенные по измерениям для ориентации [110] значения модулей C_{11} , C_{12} и C_{44} подставлялись в (3), и полученные таким образом значения скоростей звука сравнивались с непосредственно измеренными для образца с ориентацией [111]. Сопоставление показало, что в пределах точности эксперимента (около 1 %) расчетные и измеренные значения совпадают во всем диапазоне температур, что свидетельствует о достоверности полученных результатов, которые можно сравнить только с данными непосред-

венных измерений модуля всестороннего сжатия $Cd_xHg_{1-x}Te$. Рассчитанные с помощью (2) значения изотермического модуля всестороннего сжатия для состава $x = 0,2$ дают $K = (38,7 \pm 0,4) \cdot 10^{10}$ дин/см² при $T = 300$ К, что находится в достаточно хорошем согласии с данными эксперимента по гидростатическому сжатию $K = (41 \pm 2) \cdot 10^{10}$ дин/см² [5]. Рассчитанное также на основе наших измерений значение фактора анизотропии $B = 2C_{44}/(C_{11} - C_{12})$ для $Cd_{0,21}Hg_{0,79}Te$ практически не меняется в интервале 4–300 К и значительно меньше (а именно $B = 1,79$), чем в $CdTe$ ($B = 2,43$) и $HgTe$ ($B = 2,47$) [6]. Это свидетельствует об уменьшении анизотропии упругих свойств твердого раствора по сравнению с бинарными соединениями и связано, по-видимому, с разупорядочением решетки твердого раствора.

Таблица 2

Упругие параметры $Cd_{0,21}Hg_{0,79}Te$

T, K	$C_{11} \cdot 10^{10}, Pa$	$C_{12} \cdot 10^{10}, Pa$	$C_{44} \cdot 10^{10}, Pa$	$B \cdot 10^{10}, Pa$	$\nu \cdot 10^{10}, Pa$	$E \cdot 10^{10}, Pa$	$K \cdot 10^{10}, Pa$
4	61,8	34,3	24,6	1,79	0,357	37,3	43,5
20	61,7	34,2	24,6	1,79	0,357	37,3	43,4
78	61,1	33,9	24,4	1,79	0,357	36,9	43,0
100	60,8	33,6	24,3	1,79	0,356	36,8	42,7
150	59,7	32,8	24,1	1,79	0,355	36,3	41,8
200	58,5	31,9	23,9	1,79	0,353	36,0	40,8
250	57,2	30,9	23,7	1,80	0,351	35,5	39,6
300*	56,0	30,0	23,4	1,80	0,349	35,0	38,7

Таблица 3

Упругие параметры $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te$

T, K	$C_{11} \cdot 10^{10}, Pa$	$C_{12} \cdot 10^{10}, Pa$	$C_{44} \cdot 10^{10}, Pa$	$B \cdot 10^{10}, Pa$	$\nu \cdot 10^{10}, Pa$	$E \cdot 10^{10}, Pa$	$K \cdot 10^{10}, Pa$
4	67,9	40,2	25,3	1,83	0,372	38,0	49,4
20	67,8	40,2	25,3	1,83	0,372	37,9	49,4
78	67,0	39,8	25,1	1,83	0,372	37,3	48,9
100	66,5	39,4	25,0	1,84	0,372	37,2	48,4
150	65,4	38,6	24,7	1,84	0,371	36,7	47,5
200	64,1	37,8	24,4	1,85	0,371	36,1	46,6
250	63,1	37,0	24,2	1,86	0,370	35,7	45,6
300	61,9	36,2	24,0	1,86	0,369	35,2	44,8

* Данные при $T = 300$ К получены экстраполяцией температурных зависимостей.

Отметим также, что рассчитанные по результатам наших ультразвуковых измерений модулей упругости твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ значения температуры Дебая в разумных пределах совпадают со значениями этой температуры, полученными [7] по калориметрическим измерениям удельной теплоемкости.

Таким образом, значения упругих модулей твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ находятся в хорошем соответствии с другими свойствами кристаллической решетки этого материала. Представленные в настоящей работе результаты позволяют провести также оценку величин деформаций и вызванных ими напряжений на гетерограницах эпитаксиального слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$ с монокристаллической подложкой. Такие оценки были выполнены в предположении жесткого сцепления и отсутствия промежуточных слоев для составов $x = 0,21$ и $0,3$ и ряда материалов, рассматриваемых в качестве подложек. Результаты расчетов для напряжений несоответствия (они примерно на порядок выше термоупругих напряжений для рассматриваемых сочетаний сопрягаемых материалов) представлены в табл. 4.

Оказалось, что расчеты дали значения деформаций, на порядок превышающие деформации, реально существующие в исследуемой структуре – $\epsilon_{теор} = -0,002$ и $\epsilon_{эксп} = -0,0006$ соответственно. Последний результат был получен на границе эпитаксиального слоя $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$, имеющего толщину порядка 1 мкм, полученного методом осаждения в низкотемпературной высокочастотной

ртутной плазме на ориентированную монокристаллическую подложку CdTe, путем проведения прецизионных рентгеноструктурных исследований [8].

Таблица 4

Расчетные значения напряжений несоответствия в гетероструктурах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$

x	Подложка	CdTe	GaAs	InP	Si
0,21	ϵ_{xx}	-0,002676	0,011536	0,009015	0,014932
	ϵ_{zz}	0,000214	-0,000923	-0,000721	-0,001194
	σ_{xx} , кг/мм ²	8,664269	38, 213327	29,865854	49,460870
0,3	ϵ_{xx}	-0,002330	0,011491	0,009028	0,014879
	ϵ_{zz}	0,000419	-0,002068	-0,001625	-0,002678
	σ_{xx} , кг/мм ²	-8,450207	41,672257	32,739647	53,955977

Расчеты, представленные выше, выполнены в предположении о жестком сцеплении подложки и слоя. Это предположение редко реализуется на практике из-за возникновения в процессе роста между подложкой и пленкой варизонного слоя с промежуточным составом, возникающего в результате взаимной диффузии атомов наращиваемого материала и подложки. Наличие переходных слоев приводит к значительной релаксации напряжений на гетерогранице, уменьшающей в несколько раз величину напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.Н., Курбанов К.Р., Никифоров В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13. – № 11. – С. 682–686.
2. Васильев А.Н., Курбанов К.Р., Никифоров В.Н. и др. // ФТП. – 1987. – Т. 21. – № 5. – С. 944–946.
3. Васильев А.В., Гайдуков Ю.П. // УФН. – 1983. – Т. 143. – № 3. – С. 431–467.
4. Харрисон У. Электронная структура и свойства твердых тел. – М.: Мир, 1983.
5. Chen A.B., Sher A., and Yost W.T. // Semiconductors and Semimetals / ed. R.K. Wilardson and A.C. Beer. – 1992. – V. 37.
6. Qadri S.B., Skelton E.F., and Webb A.W. // J. Vac. Sci. Technol. – 1986. – V. A4. – No. 3. – P. 1974–1976.
7. Берченко Н.Н., Кревс В.Е., Средин В.Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. – М.: Воениздат, 1982. – 208 с.
8. Средин В.Г., Никифоров В.Н., Васильева О.Н. // Изв. вузов. Мат. электрон. техн. – 2000. – № 3. – С. 61–64.
9. Арешкин А.Г., Васильева Л.И., Литвинова Н.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 1995. – № 8. – С. 112–114.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия

**Военная академия ракетных войск стратегического назначения
им. Петра Великого, г. Москва, Россия

***Кременчугский институт Днепропетровского университета
экономики и права, г. Кременчуг, Украина

Поступила в редакцию 03.11.10.