

## УПРУГИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГАФНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 78...300 К

*А.В. Корниец, А.С. Булатов*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,  
Харьков, Украина*

*E-mail: bulatov@kipt.kharkov.ua; тел. +38(057)700-26-76*

В интервале температур 78...300 К измерены скорости распространения  $V_{ij}(T)$  продольных, квазипродольных и сдвиговых ультразвуковых волн и соответствующие коэффициенты поглощения  $\alpha_{ij}(T)$  в монокристалле Hf(0,3%Zr) при использовании импульсной ультразвуковой техники с рабочей частотой 50 МГц. С помощью экспериментальных результатов  $V_{ij}(T)$  определены пять независимых адиабатических констант  $c_{ij}$  тензора упругости монокристалла. По данным  $c_{ij}(T)$  вычислены коэффициенты тензора податливости; линейные сжимаемости; модули Юнга, сдвига; коэффициенты Пуассона параллельно и перпендикулярно к  $c$ -оси. В приближении Фойгта-Рейсса-Хилла определены изотропные величины модулей. На зависимостях  $c_{11}(T)$  и  $c_{33}(T)$  обнаружена аномалия, вызванная изменением в фононном спектре Hf(0,3%Zr). Показано, что резонансные особенности в поведении  $\alpha_{11}(T)$  и  $\alpha_{33}(T)$  обусловлены дислокациями роста в монокристалле.

### ВВЕДЕНИЕ

Гафний привлекает постоянное внимание совокупностью уникальных физико-механических свойств, позволяющих многофункционально использовать его в аэрокосмической технике, атомной и электронной промышленности не только в виде компонента сплавов и соединений, но и в качестве конструкционного материала благодаря высокой прочности, упругости, плотности и стойкости к радиационному и механическому износам. В связи с этим исследования упругих и акустических свойств монокристаллического Hf прецизионными методами физической акустики приобретают актуальный интерес как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Поскольку низкотемпературные исследования наиболее отчетливо обнаруживают особенности в поведении физических свойств, то в данной работе преследовалась цель – изучить температурную зависимости скорости распространения  $V_{ij}(T)$ , коэффициентов поглощения  $\alpha_{ij}(T)$  ультразвуковых волн и констант  $c_{ij}(T)$  тензора упругости монокристаллического гексагонального Hf в температурном интервале 78...300 К. Анализ зависимостей  $V_{ij}(T)$  и  $c_{ij}(T)$  может дать предварительную сигнальную информацию о возможном изменении в фононном спектре. С прикладной позиции данные  $c_{ij}(T)$  позволяют определить адиабатическую сжимаемость, модули Юнга, модули сдвига и другие величины, используемые в инженерной практике. В литературных источниках имеются единственные сведения о зависимости  $c_{ij}(T)$  монокристалла Hf(4,1%Zr) в интервале 4,2...298 К с температурным шагом  $\Delta T=25$  К и носят, скорее, абрисный характер [1]. Отсутствует информация о коэффициенте поглощения  $\alpha_{ij}(T)$ , который, помимо прочего, отображает совершенство монокристалла, учитывая поляризационную и объемную проникающую способности акустических волн. Наконец, следует

подчеркнуть, что физические свойства гафния в большой степени зависят от содержания химических примесей и структурного состояния. Конкретный учет влияния этих факторов требует исследований на монокристаллах.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Монокристаллы гафния были вырезаны из массивного металлургического друза, полученного методом термической диссоциации четырехйодистого гафния (способ Ван-Аркеля) [2]. В нашем случае процесс разложения протекал при температуре нагрева  $(1200 \pm 50)^\circ\text{C}$  молибденовой проволоки диаметром 0,5 мм. Образцы были вырезаны в виде прямоугольников. Один Hf-I  $(4,3 \times 2,9 \times 2,8 \text{ мм}^3)$  огранен шлифованными плоскопараллельными противоположными сторонами параллельно и перпендикулярно к направлению кристаллографической оси [0001], что обеспечило ориентацию векторов распространения и поляризации акустической волны под углами  $\varphi=0$  и  $90^\circ$  относительно гексагональной  $c$ -оси. Второй Hf-II  $(4,0 \times 4,5 \times 2,8 \text{ мм}^3)$  огранен под углом  $\varphi=61,2^\circ$  к направлению [0001]. Ориентация кристаллов выполнена на рентгенодифрактометрическом гониометре с точностью  $\pm 0,5^\circ$ . По рентгеноструктурным данным параметры кристаллической решетки монокристалла Hf  $a$  и  $c$  (при 298 К) равнялись  $(3,1950 \pm 5) \cdot 10^{-4}$  и  $(5,0542 \pm 5) \cdot 10^{-4}$  Å, что отвечает величине его плотности  $\rho=13,263 \text{ г/см}^3$ . Мозаичность кристаллов была  $\sim 10'$ . Согласно рентгеноспектральному анализу основная примесь циркония не превышала 0,3%, а суммарное содержание прочих металлов было не более 0,5%. Отношение сопротивлений  $\rho_{300 \text{ К}}/\rho_{4,2 \text{ К}} \sim 20$ . Возбуждение продольных (L) и сдвиговых (S) плоскополяризованных акустических волн в монокристаллах создавалось пьезопреобразователями, изготовленными из монокристалла ниобата лития, с собственной резонансной частотой 50 МГц.

Применялась импульсная техника с использованием метода акустического моста, компенсируемого по частоте, которая позволяла одновременно измерить обе линейные акустические характеристики: скорости распространения продольных  $V_L$  и сдвиговых  $V_S$  звуковых волн и коэффициенты поглощения  $\alpha_L$  и  $\alpha_S$  соответственно. Подробно экспериментальные детали и методика анализа измерений описаны в работе [3]. Точность определения относительных изменений  $V_{L,S} \sim 10^{-6}$ , а  $\alpha_{L,S} \sim 10^{-3}$ . Исследования выполнялись в сосуде Дьюара в режиме отогрева с температурным шагом 0,2 К и стабилизацией в измерительных точках с точностью  $\pm 0,01$  К, которая достигалась с помощью прецизионного программного терморегулятора. Для создания высокоэффективного акустического контакта «пьезопреобразователь-образец» использовалась кремнийорганическая смазка и мед. Величины коэффициента поглощения ультразвуковых волн были нормированы к максимальному значению  $\alpha_{ij}$  и сведены к единой величине на  $\Delta\alpha(T)$  при температуре 78 К. Все это позволило эффективно проследить за влиянием температуры на изменение поглощения ультразвука в исследуемом диапазоне температур.

Данные скорости распространения  $V_{L,S}$  дали возможность определить константы упругости  $c_{ij}$  и их комбинации  $f(c_{ij})$  согласно общепринятому уравнению:

$$\rho V_{L,S}^2 = f(c_{i,j}).$$

Кристалл Hf-I позволил определить константы упругости  $c_{11}$ ,  $c_{33}$  и  $c_{44}$  непосредственно из прямых измерений скорости  $V_L$  в направлении  $\varphi=0^\circ$  ( $c_{33}$ ) и  $\varphi=90^\circ$  ( $c_{11}$ ) и измерений скорости  $V_S$  вдоль  $\varphi=0^\circ$  ( $c_{44}$ ) независимо от направления вектора поляризации. Скоростью  $V_S$  (вектор поляризации и распространения – перпендикулярно оси [0001]) определяются значения  $c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12})$ , из уравнения которого извлекается независимая константа  $c_{12}$ .

В кристалле Hf-II возбуждались квази-продольные колебательные моды. В этом случае связь скорости  $V_{ql}$  и констант упругости представляется сложным уравнением, приведенным в работе [1]:

$$2\rho V_{QL}^2 = c_{33}\cos^2\phi + c_{11}\sin^2\phi + c_{44} + \left\{ \left[ c_{11}\sin^2\phi - c_{33}\cos^2\phi + c_{44}(\cos^2\phi - \sin^2\phi) \right]^2 + 4\cos^2\phi\sin^2\phi(c_{13} + c_{44})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Из этого уравнения определялась пятая независимая константа упругости гексагонального гафния –  $c_{13}$ . Суммарная оценка погрешности (включая плотность и геометрические отклонения) в абсолютных значениях констант упругости  $c_{11}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{44}$  и  $c_{66}$  равна 0,5%, а в значениях  $c_{12} \sim 1\%$  и для величины  $c_{13}$  – на уровне 2%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Скорость ультразвука.** Температурные зависимости от 78 до 300 К скорости распространения продольных ( $V_{11}$  и  $V_{33}$ ) и квазипродольных ( $V_{ql}$ ) и сдвиговых ( $V_{44}$  и  $V_{66}$ ) ультразвуковых волн представлены на рис. 1.

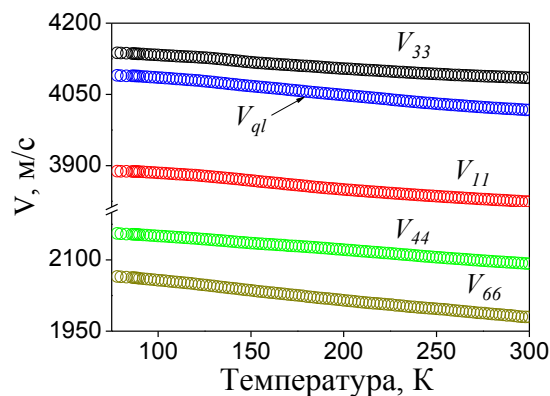


Рис. 1. Температурные зависимости скорости продольных ( $V_{11}$ ,  $V_{33}$ ), квазипродольных ( $V_{ql}$ ) и сдвиговых ( $V_{44}$ ,  $V_{66}$ ) волн частотой 50 МГц в монокристалле Hf.  $V_{33}$ ,  $V_{11}$ ,  $V_{ql}$  – распространения звука параллельно, перпендикулярно и под углом  $\varphi=61,2^\circ$  относительно направления  $c$ -оси кристалла;  $V_{44}$ ,  $V_{66}$  – направление соответственно параллельно и перпендикулярно  $c$ -оси (поляризация произвольная)

Температурный ход кривых  $V_{11}(T)$  и  $V_{33}(T)$  практически подобен, но абсолютные значения  $V_{33} > V_{11}$  в среднем на 7%. Аналогичную зависимость от температуры демонстрируют кривые  $V_{44}(T)$  и  $V_{66}(T)$ , при этом  $V_{44} > V_{66}$  в среднем на 5%. Это говорит о существовании в криогенной области заметной анизотропии коэффициентов упругости и теплового расширения вдоль главных кристаллографических осей Hf, свойственных ГПУ-кристаллам, обладающим неидеальной плотностью атомной упаковки. С понижением температуры наблюдается закономерный рост величины скорости ультразвуковых волн, обусловленный вкладом теплового движения в кристалле. Учитывая влияние акустической волны на функцию распределения фононных состояний, адиабатическое изменение скорости ультразвука может быть представлено в виде [4]

$$\frac{\Delta V}{V} \sim -\frac{TC_V(V)}{2\rho V^2} \gamma^2,$$

где  $\gamma$  – температурно-усредненный тензор постоянных Грюнайзена первого и второго порядка;  $C_V$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность. При рассмотрении кривых  $V_{11}(T)$  и  $V_{33}(T)$  (см. рис. 1) можно заметить две характерные области их температурной зависимости. Левая (78...130 К) – скорость ультразвука демонстрирует линейную зависимость от температуры, правая (130...300 К) – проявляет несколько вогнутый вид, обусловленный развитием термоактивированных релаксационных процессов фононного рассеяния. На кривых  $V_{44}(T)$  и  $V_{66}(T)$  эта особенность не проявляется. Это свидетельствует о меньшем влиянии на фононный спектр (нарушение

равновесного распределения фононов) сдвиговых ультразвуковых волн. Следует отметить, что такая особенность отмечалась и в кадмии [5] (на примере коэффициента поглощения), где вклад фононного рассеяния (потерь Ахиезера) в поглощение продольных волн был значительно выше, чем у сдвиговых.

**Поглощение ультразвука.** Нормированный коэффициент поглощения продольных ультразвуковых волн частотой 50 МГц в диапазоне температур 78...300 К в монокристалле Hf-I отображен на рис. 2.

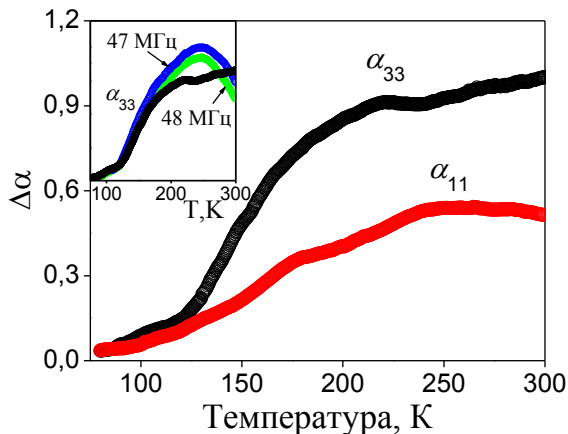


Рис. 2. Температурные зависимости изменения нормированного коэффициента поглощения продольных волн частотой 50 МГц в монокристалле Hf.  $\alpha_{33}$ ,  $\alpha_{11}$  – коэффициенты поглощения ультразвука при его распространении параллельно и перпендикулярно с-оси кристалла. На вставке –  $\alpha_{33}(T)$  при частотах 47 и 48 МГц

Как можно заметить на рис. 2, в температурном ходе кривых  $\Delta\alpha(T)$  обнаруживается низкотемпературная область с линейным видом зависимости, которая сменяется относительно крутой «переходной» областью, а при более высоких температурах отмечается тенденция к слабой зависимости от температуры. Принято считать, что крутая температурно-зависимая часть поглощения отвечает за фонон-фононное взаимодействие, когда между ультразвуковой волной и тепловыми упругими волнами решетки наблюдается эффективное взаимодействие [6]. Ультразвуковые волны в данном случае могут рассматриваться как статическая однородная деформация. Эта деформация модулирует частоты тепловых фононных мод и, таким образом, модулирует их равновесные заселенности. Для перехода к новым равновесным заселенностям мод необходимо конечное время релаксации. Поскольку фактическая заселенность фононных мод отстает по фазе распространяющейся волны деформации, вызываемой акустической волной, то между напряжением и деформацией в волне имеется небольшая разность фаз, следовательно, происходят потери энергии акустических колебаний за каждый период.

Наблюдение «нерегулярности», отсутствие гладкого характера в небольших температурных

интервалах во всех наблюдаемых областях обусловлены дефектами в кристалле, основными из которых являются дислокации роста. Следует учесть, что зарождение монокристаллов Hf происходит по схеме пар-кристалл, и рост идет путем последовательного отложения кристаллических слоев. Простейшей моделью может служить эшелон параллельных друг другу одинаковых элементарных или более толстых слоев. Ступенчатая поверхность, как целое, перемещается параллельно нормали к исходной сингулярной грани. При этом реализуется ситуация, когда на поверхность выходят винтовые дислокации, которые не исчезают в процессе роста в силу того, что кристалл фактически состоит из атомных плоскостей, свернутых в «геликоид». Присутствие дислокаций роста вносят «нерегулярность» на зависимостях  $\Delta\alpha(T)$  и сдвиг вышеуказанных температурных областей (см. рис. 2), что свидетельствует о чувствительности коэффициента поглощения ультразвука к ориентации вектора Бюргерса дислокаций. При незначительном (до ~ 3 МГц) изменении частоты ультразвука (см. рис. 2, вставка) наблюдалось заметное усиление выявленных особенностей на кривых  $\Delta\alpha(T)$  без изменения их температуры локализации. В рамках струнной модели Гранато-Люкке [7] это свойственно колебаниям в пределах потенциальной ямы Пайерлса-Набарро участков дислокаций, закрепленных примесными атомами. Поглощение ультразвуковых волн в данном случае вызвано наличием сил торможения, демпфирующих колебание дислокаций. Как следует из струнной теории, при определенной частоте коэффициент поглощения ультразвуковых волн должен иметь максимум. Величина максимума определяется соотношением величин собственной резонансной частоты дислокационного отрезка и сил торможения, демпфирующих его колебание. Очевидным является то, что обе величины чувствительны к температуре. Потери энергии ультразвуковой волны, вызванные такими колебаниями дислокационных отрезков, в рамках струнной модели можно количественно оценить при помощи выражения:

$$\alpha = N \left( \frac{\omega^2}{\omega_0} \right) F(\omega) d \Lambda L^2,$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{L} \left( \frac{2G}{\rho(1-\nu)} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $F(\omega) = \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \left( \frac{d}{\omega_0} \right)^2 \right\}^{-1}$ ,

$N = \frac{2(1-\nu)}{V\pi^3}$ ,  $d = \frac{B}{2\pi\rho b^2}$  (d – величина демпфи-

рования; B – коэффициент динамического торможения; b – вектор Бюргерса;  $\rho$  – плотность;  $\omega$  – круговая частота;  $\Lambda$  – плотность дислокаций;  $\omega_0$  – собственная частота колебаний дислокационных сегментов; L – длина дислокационных сегментов; G – модуль сдвига; V – скорость звука).

Более наглядно дислокационное трение проявляется при распространении в кристалле сдвиговых ультразвуковых волн. К сожалению, из-за ограниченности температурного интервала

измерений коэффициента поглощения сдвиговых ультразвуковых волн, наблюдаемая переходная область обрывается на начальном этапе, тем самым исключается возможность исследования влияния дислокационной структуры на поглощение сдвиговых волн в исследуемом образце.

**Константы упругости.** Температурные зависимости основных адиабатических констант тензора упругости ( $c_{11}$  и  $c_{33}$ ) монокристалла гафния от 78 до 300 К показаны на рис. 3.

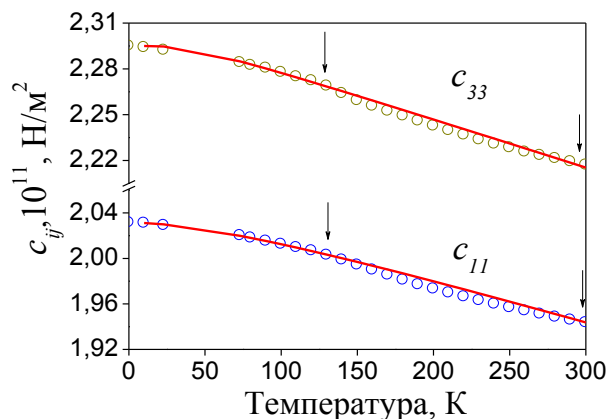


Рис. 3. Зависимости от температуры адиабатических констант тензора упругости в монокристаллическом Hf

Температурный ход кривых  $c_{11}(T)$  и  $c_{33}(T)$  практически подобен, но абсолютные значения  $c_{33} > c_{11}$  в среднем на 12%. Это дает основание предположить о существовании в криогенной области заметной анизотропии коэффициентов линейного расширения вдоль главных кристаллографических осей Hf, данные о которых пока отсутствуют. Обращает на себя внимание, что в температурной области 125...300 К кривые  $c_{11}(T)$  и  $c_{33}(T)$  приобретают вогнутый характер. Аномальная часть выделена стрелками. На наш взгляд, основным фактором аномалии может быть эффект смягчения фононного спектра, вызванный релаксационными процессами фононного рассеяния. Следует отметить, что наши значения  $c_{11}$  и  $c_{33}$  на ~8% превышают известные данные [1], что обусловлено более высокой чистотой и значением рентгеновской плотности монокристаллов.

Рис. 4 иллюстрирует температурные зависимости трех независимых констант упругости ( $c_{12}$ ,  $c_{13}$  и  $c_{44}$ ) и вспомогательной константы упругости  $c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12})$  в области температур 78...300 К.

В наборе констант выделяются зависимости  $c_{12}(T)$  и  $c_{13}(T)$ , для которых характерен рост их величины с повышением температуры, что вызвано различием температурного хода кривых  $c_{11}(T)$  и  $c_{66}(T)$ . Представленные выше температурные зависимости  $c_{ij}$  удовлетворительно согласуются с известным соотношением Varshni [8]:

$$c_{ij}(T) = c_{ij}^0 - \frac{s}{e^{t/T} - 1},$$

где  $c_{ij}^0$ ,  $t$  и  $s$  – константы;  $c_{ij}^0$  – значение константы упругости при 0 К. Для определения  $c_{ij}^0$  кривые  $c_{ij}(T)$  были проэкстраполированы до температуры 0 К. Результаты расчетов зависимостей  $c_{ij}(T)$ , выполненных согласно уравнению Varshni, отображены на рисунках сплошной линией.

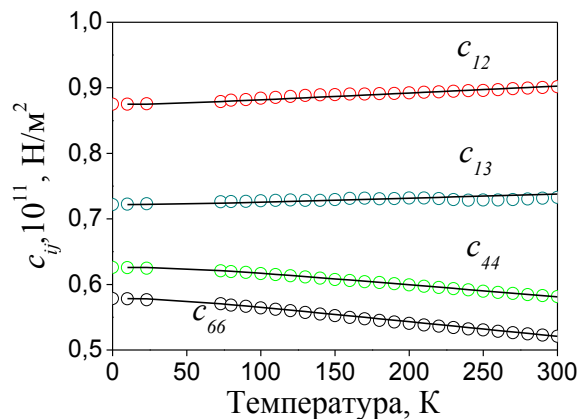


Рис. 4. Зависимости адиабатических констант тензора упругости монокристалла Hf от температуры. Сплошные линии – расчетные данные согласно уравнению Varshni

Следует отметить, что полученные данные  $c_{ij}(T)$  удовлетворяют условию термодинамической стабильности кристалла гексагональной симметрии, выраженной в комбинационной форме [9]:

$$c_{11}^2 - c_{12}^2 > 0; \quad c_{33}(c_{11} + c_{12}) - 2c_{13}^2 > 0; \\ c_{11}c_{33} - c_{13}^2 > 0.$$

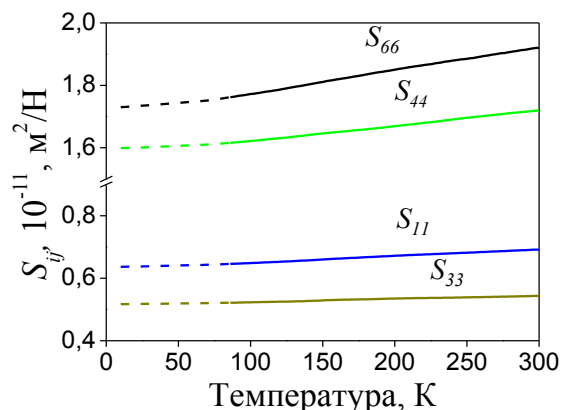


Рис. 5. Температурные зависимости коэффициентов тензора упругой податливости в монокристалле гафния

Используя полный набор независимых констант упругости монокристаллического Hf, можно проследить за изменением с температурой независимых коэффициентов тензора упругой податливости (рис. 5, 6), вычисление которых проводилось с использованием известного уравнения [10]:

$$s_{ij} = \frac{(-1)^{i+j} \Delta c_{ij}}{\Delta^c},$$

где  $\Delta^c$  – детерминант  $\|c_{ij}\|$ ;  $\Delta c_{ij}$  – минор, получаемый вычеркиванием  $i$  строки и  $j$  столбца;  $(-1)^{i+j} \Delta c_{ij}$  – алгебраическое дополнение величины  $c_{ij}$  в детерминанте  $\Delta^c$ . Данные величины также демонстрируют анизотропию.

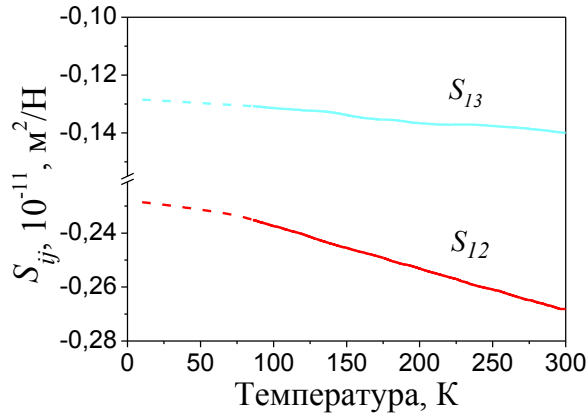


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициентов тензора упругой податливости в монокристалле гафния

Расчеты линейных адиабатических величин сжимаемости  $\beta_{//}(T)$  и  $\beta_{\perp}(T)$  соответственно параллельно и перпендикулярно  $c$ -оси и объемной сжимаемости кристалла выполнялись с использованием следующих уравнений [1]:

$$\beta_{//} = \frac{c_{11} + c_{12} - 2c_{13}}{c_{33}(c_{11} + c_{12}) - 2c_{13}^2};$$

$$\beta_{\perp} = \frac{c_{33} - c_{13}}{c_{33}(c_{11} + c_{12}) - 2c_{13}^2}; \beta_v = 2\beta_{\perp} + \beta_{//}.$$

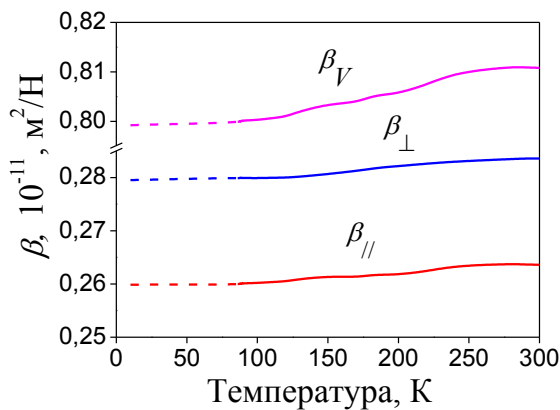


Рис. 7. Температурные зависимости адиабатической сжимаемости в монокристалле гафния.  $\beta_{//}$ ,  $\beta_{\perp}$  – линейные сжимаемости соответственно в направлениях, параллельном и перпендикулярном  $c$ -оси кристалла;  $\beta_v$  – объемная сжимаемость

Результаты расчетов приведены на рис. 7. Сравнение наших результатов для  $\text{Hf}(0,3\% \text{Zr})$  с данными [1] для  $\text{Hf}(4,1\% \text{Zr})$  однозначно демонстрирует, что уменьшение содержания примеси циркония приводит к эффекту понижения значения параметров сжимаемости. Например, при  $T = 80 \text{ K}$   $\beta_{//}$  уменьшается на 14%, а  $\beta_{\perp}$  – на 8,5%. Подобие температурных зависимостей  $\beta_{//}(T)$  и  $\beta_{\perp}(T)$

достаточно отчетливо прослеживается, не отмечая существенного различия в температурном ходе.

Аналогичный расчет влияния температуры осуществлен для модулей Юнга ( $E_{//}$  и  $E_{\perp}$ ), модулей сдвига ( $G_{//}$  и  $G_{\perp}$ ) с помощью уравнений [1]:

$$E_{//} = \frac{c_{33}(c_{11} + c_{12}) - 2c_{13}^2}{c_{11} + c_{12}}; \quad G_{//} = c_{66} = \frac{1}{S_{66}};$$

$$E_{\perp} = \frac{2c_{66}[c_{33}(c_{11} + c_{12}) - 2c_{13}^2]}{c_{11}c_{33} - c_{13}^2}; \quad G_{\perp} = c_{44} = \frac{1}{S_{44}}.$$

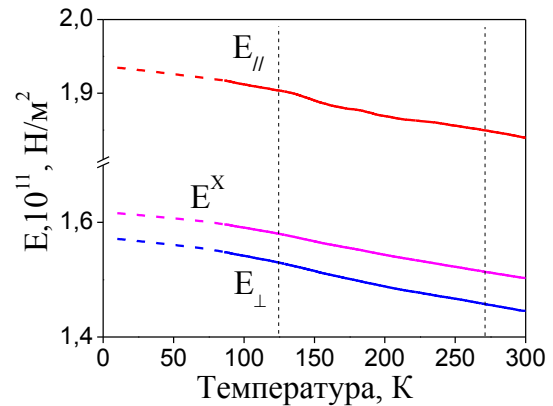


Рис. 8. Температурные зависимости модуля Юнга в монокристалле гафния.  $E_{//}$ ,  $E_{\perp}$  – линейные модули в направлениях, параллельном и перпендикулярном  $c$ -оси кристалла;  $E^X$  – изотропный модуль, определенный по методу Фойгта-Рейсса-Хилла

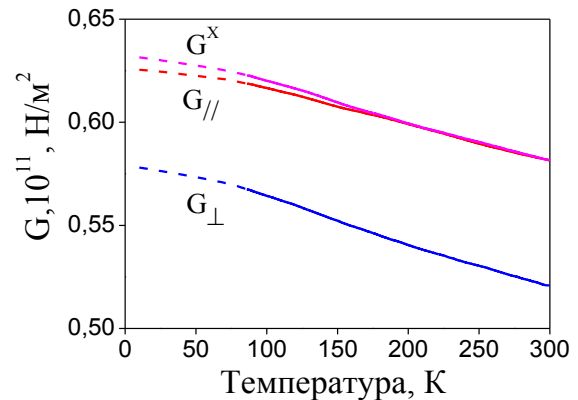


Рис. 9. Температурные зависимости модуля сдвига в монокристалле гафния.  $G_{//}$ ,  $G_{\perp}$  – линейные модули соответственно в направлениях, параллельном и перпендикулярном  $c$ -оси кристалла;  $G^X$  – изотропный модуль, определенный по методу Фойгта-Рейсса-Хилла

В приближении Фойгта-Рейсса-Хилла [11] определены изотропные модули, свойственные поликристаллам. Результаты вычислений показаны на рис. 8, 9.

Как видим, с ростом температуры величины модулей уменьшаются с практически параллельным температурным ходом. В интервале температур 130...270 K кривые демонстрируют несколько вогнутой характер. Особенно это проявляется на зависимости  $E_{//}(T)$ , где указанный интервал температур выделен пунктиром. Как отмечалось ранее, вогнутый вид температурной зависимости констант тензора упругости обусловлен развитием



релаксационных процессов фононного рассеяния. Вместе с тем следует отметить, что для чистого гафния источником релаксации помимо фононного спектра могут быть и участки дислокаций, вследствие возможного образования на них двойных перегибов через потенциальный барьер Пайерлса-Набарро (по типу Бордони). Уменьшение концентрации примеси циркония также способствовало росту изотропного модуля Юнга в среднем на 8%, а модуля сдвига – на 2% в сравнении с данными [1].

В ряду упругих характеристик материалов коэффициент Пуассона, определяющий отношение относительной поперечной деформации к продольной, занимает особое место. По величине коэффициента Пуассона на качественном уровне можно говорить о пластичности материала. Принято считать [12], что металлы, обладающие коэффициентом Пуассона 0,32 и выше, имеют высокую пластичность. Как и упругие характеристики, представленные выше, линейные коэффициенты Пуассона монокристаллического гафния можно определить [10], привлекая данные  $c_{ij}(T)$ .

$$\nu_{//} = \frac{c_{13}}{c_{11} + c_{12}}; \quad \nu_{\perp} = \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}^2}{c_{11}c_{13} - c_{13}^2}.$$

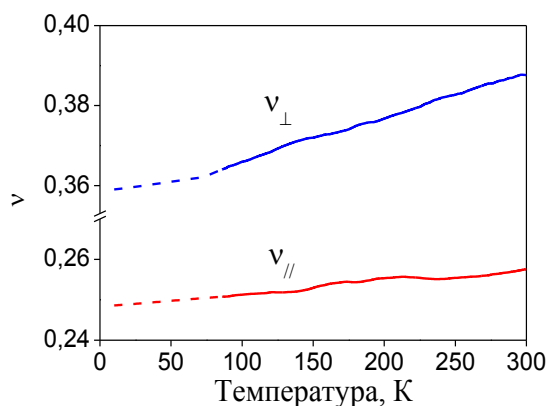


Рис. 10. Температурные зависимости коэффициента Пуассона в монокристалле гафния.  $\nu_{//}$ ,  $\nu_{\perp}$  – приложение упругой деформации в направлениях, параллельном и перпендикулярном с-оси кристалла

Результаты вычислений показаны на рис. 10. Обращает на себя внимание  $\nu_{\perp}(T)$  как величиной, так и более заметной крутизной температурного хода, указывающей на более существенную потерю пластичности с понижением температуры. Следует отметить, что наблюдаемые различия  $\nu_{//}$  и  $\nu_{\perp}$  коррелируют со способностью данного материала к пластической деформации скольжением в призматических и базисных атомных плоскостях.

## ВЫВОДЫ

Итак, суммируя результаты выполненных ультразвуковых исследований, необходимо отметить, что приводятся новые сведения о прецизионных низкотемпературных (78...300 К) исследованиях упругих и акустических свойств

чистого монокристаллического гафния. Впервые представлен полный набор независимых констант тензора упругости ( $c_{11}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$  и  $c_{44}$ ) для чистого гафния. На зависимостях  $c_{11}(T)$  и  $c_{33}(T)$  обнаружена аномалия, обусловленная проявлением смягчения фононного спектра кристаллической решетки чистого гафния. На основе экспериментальных данных констант упругости  $c_{ij}$  вычислена температурная зависимость независимых коэффициентов тензора упругой податливости, макроскопических упругих параметров: адиабатической сжимаемости, модулей Юнга, сдвига для чистого монокристалла Hf, что может быть полезным для прикладных целей. Впервые получены оригинальные данные о температурных зависимостях коэффициентов поглощения  $\alpha_{11}(T)$  и  $\alpha_{33}(T)$ , которые демонстрируют наличие резонансного дислокационного трения, свойственного чистым металлам. Высказывается предположение о возможности релаксационного дислокационного трения по типу Бордони.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. E.S. Fisher and C.J. Renken. Single Crystal Elastic and the hcp→bcc Transformation in Ti, Zr and Hf // *Phys. Rev.* 1964, v. 135, N 2A, p. A482-A494.
2. Н.В. Барышников, В.Э. Гегер, Н.Д. Денисова, А.А. Казайн, В.А. Кожемякин, Л.Г. Нехамкин, В.В. Родекин, Ю.А. Цылов. *Металлургия циркония и гафния*. М.: «Металлургия», 1979, с. 207.
3. В.Д. Филь, П.А. Безуглый, Е.А. Масалитин, В.И. Денисенко. Установка для изучения изменений поглощения и скорости ультразвука // *ПТЭ*. 1973, №3, с. 210-213.
4. R. Nava, M. Saint-Paul, H. Noel, J.C. Levet, P. Gougeon. Sound Velocity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  and  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  Single Crystals // *Physica C*. 1990, v. 167, p. 59-61.
5. A.K. Gupta, A. Gupta, S. Tripathi, V. Bhalla, D. Singh. Ultrasonic Properties of Hexagonal Closed Packed Metals // *Universal Journal of Materials Science*. 2013, v. 1(2), p. 63-68.
6. P. Truel, Ch. Elbaum, B. Chick. *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*. New York and London: Academic Press, 1969, p. 292.
7. Р. Труэл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. *Ультразвуковые методы в физике твердого тела*. М.: «Мир», 1972, с. 142.
8. Y.P. Varshni. Temperature Dependence of the Elastic Constants // *Phys. Rev. B*. 1970, v. 2, N 10, p. 3952-3958.
9. G.A Alers and J.R Neighbours. Crystal Stability and Elastic Constants // *J. Appl. Phys.* 1995, v. 2, p. 1514.
10. Л.И. Анатичук, В.В. Малишко, П. Михальченко, В.В. Моцкін. Пружні сталі сплаву  $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$  при  $T=293\text{K}$  // *Фізика і хімія твердого тіла*. 2006, т. 7, №1, с. 138-146.
11. У. Мезон. *Физическая акустика. Динамика решетки*. Т. 3, ч. Б. М.: «Мир», 1968, с. 63.
12. Т.П. Черняева, В.М. Грицина, Е.А. Михайлов, А.В. Остапов. Корреляция между упругостью и

*Статья поступила в редакцию 19.07.2017 г.*

## **ПРУЖНІ І АКУСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО ГАФНІЮ В ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР 78...300 К**

*А.В. Корнієць, О.С. Булатов*

У інтервалі температур 78...300 К виміряні швидкості поширення  $V_{ij}(T)$  поздовжніх, квазіпоздовжніх і зсувних ультразвукових хвиль і відповідні коефіцієнти поглинання  $\alpha_{ij}(T)$  в монокристалі Hf(0,3%Zr) при використанні імпульсної ультразвукової техніки з робочою частотою 50 МГц. За допомогою експериментальних результатів  $V_{ij}(T)$  визначені п'ять незалежних адиабатичних сталих  $c_{ij}$  тензора пружності монокристалу. За даними  $c_{ij}(T)$  обчислені коефіцієнти тензору піддатливості; лінійні стисливості; модулі Юнга, зсуву; коефіцієнти Пуассона паралельно і перпендикулярно до  $c$ -осі. У наближенні Фойгта-Рейсса-Хілла визначені ізотропні величини модулів. На залежностях  $c_{11}(T)$  і  $c_{33}(T)$  виявлена аномалія, викликана зміною в фононному спектрі Hf(0,3%Zr). Показано, що резонансні особливості в поведінці  $\alpha_{11}(T)$  і  $\alpha_{33}(T)$  обумовлені дислокаціями зростання в монокристалі.

## **ELASTIC AND ACOUSTIC PROPERTIES OF HAFNIUM SINGLE CRYSTAL IN 78...300 K TEMPERATURE REGION**

*A.V. Korniets and A.S. Bulatov*

In the temperature range between 78 and 300 K, the propagation velocities  $V_{ij}(T)$  of longitudinal, quasilongitudinal and shear ultrasonic waves and the corresponding absorption coefficients  $\alpha_{ij}(T)$  have been measured in a Hf(0.3%Zr) single crystal at 50 MHz using a pulsed ultrasonic technique. Five independent adiabatic constants  $c_{ij}$  of the single crystal elastic tensor have been determined using the  $V_{ij}(T)$  experimental results. The  $c_{ij}$  data have been used to calculate adiabatic coefficients of the compliance tensor, linear compressibilities, Young's moduli, shear moduli, Poisson's coefficients along and across the  $c$  axis of the crystal. In the Voigt-Reuss-Hill approximation, the isotropic values of the moduli have been determined. The anomaly caused by changes in the Hf(0.3%Zr) phonon spectrum have been observed in the  $c_{11}(T)$  and  $c_{33}(T)$  curves. It is shown that the resonance singularities in the behavior of  $\alpha_{11}(T)$  and  $\alpha_{33}(T)$  are attributed to growth dislocations in a single crystal.