

10,03

Влияние атомной массы и изотопной разупорядоченности на фононные спектры кристаллов изотопно-обогащенного германия

© Т.В. Котерева¹, В.А. Гавва¹, В.А. Липский¹, А.В. Нежданов², В.Г. Плотниченко³, А.Д. Буланов^{1,2}

¹ Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³ Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия

E-mail: kotereva@ihps-ppov.ru

Поступила в Редакцию 23 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 23 апреля 2024 г.

Принята к публикации 20 июня 2024 г.

Изучено влияние средней атомной массы и изотопной разупорядоченности на фононные спектры решеточного ИК-поглощения и комбинационного рассеяния света (КРС) для монокристаллов изотопов германия ^{72}Ge , ^{74}Ge и ^{73}Ge в сравнении с $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$. При температуре 15 К в инфракрасных (ИК) спектрах наблюдались различия в ширине и положении полос двухфононного поглощения монокристаллического германия $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ и ^{73}Ge . В спектрах КРС первого и второго порядков найден сдвиг частот фононов в коротковолновую область, связанный с уменьшением средней атомной массы монокристаллов германия.

Ключевые слова: элементарные полупроводники, стабильные изотопы германия, изотопные эффекты, комбинационное рассеяние света, ИК-поглощение.

DOI: 10.61011/FTT.2024.08.58611.97

1. Введение

Получение, изучение свойств и практическое применение веществ с высокой степенью химической и изотопной чистоты является одним из динамично развивающихся направлений фундаментальных и прикладных исследований. Особый интерес вызывает получение кристаллических твердых полупроводников и изучение влияния изотопного состава на их свойства. Одним из перспективных объектов для этих исследований является германий. Разработанная недавно гидридная технология получения стабильных изотопов германия с высокой степенью химической и изотопной чистоты [1] позволила получать образцы в количестве, достаточном для проведения исследований. Принципиальная возможность получения германия в виде монокристаллов с высокой химической чистотой и наличие пяти стабильных изотопов ^{70}Ge (20.57%), ^{72}Ge (27.45%), ^{73}Ge (7.75%), ^{74}Ge (36.50%), ^{76}Ge (7.73%) [2] позволила использовать его в качестве объекта для получения фундаментальных знаний о влиянии изотопного состава на свойства полупроводников.

Влияние изотопного состава на свойства кристаллов связано с двумя факторами: изменением средней атомной массы и изотопной разупорядоченностью. Изменение атомной массы приводит к изменению параметра решетки кристаллов и деформации фононного спектра, который, в свою очередь, может оказывать влияние на электронные свойства твердых тел через механизм

электрон-фононного взаимодействия. Изучение зависимости ряда свойств от атомной массы изотопа Ge показало, что в большинстве случаев она хорошо описывается в рамках модели виртуального кристалла [3,4]. Изотопический беспорядок оказывает сильное влияние на теплопроводность [5] и термоэдс [6] германия в области низких температур.

Хорошо разработанными методами изучения изотопных эффектов в фононном спектре кристаллов являются комбинационное рассеяние света (КРС) и абсорбционная инфракрасная (ИК) спектроскопия. Ранее эти методы использованы для изучения колебательных спектров кристаллов изотопов Ge и Si в работах [7,8].

Спектры ИК-поглощения монокристаллов изотопов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge в области $520\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ изучены в [9]. Наблюдался сдвиг полос в длинноволновую область с увеличением атомной массы изотопа. Показано влияние легирующей примеси на коэффициент ослабления в области поглощения кристаллической решетки. Табличные данные о положении максимумов полос ИК-поглощения кристаллической решетки изотопов ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge , ^{76}Ge получены в [10]. В [11] исследовалось влияние изотопного беспорядка на спектры ИК-поглощения германия с использованием образцов ^{76}Ge и Ge с природным изотопным составом. Изучаемые образцы различались как по средней атомной массе, так и по степени изотопной разупорядоченности, что затрудняет выделение влияния каждого фактора. Таким образом, выявление эффектов, вызванных только изо-

Таблица 1. Значения средней атомной массы и фактора изотопической разупорядоченности образцов германия

Образец	^{nat} Ge	⁷² Ge	⁷³ Ge	⁷⁴ Ge	⁷² Ge _{0.5} ⁷⁴ Ge _{0.5}
Средняя атомная масса	72.605	72.0002	73.0002	73.9991	72.9999
Фактор изотопической разупорядоченности <i>g</i>	$5.87 \cdot 10^{-4}$	$5.27 \cdot 10^{-8}$	$1.93 \cdot 10^{-7}$	$3.53 \cdot 10^{-7}$	$1.88 \cdot 10^{-4}$

топным беспорядком, возможно при сравнении спектров образцов с одинаковой атомной массой.

Изучению комбинационного рассеяния света в кристаллах германия посвящен ряд работ. В [12] исследованы спектры КРС первого порядка для природного германия, его изотопов ⁷⁰Ge (95.9%), ⁷³Ge, ⁷⁴Ge (95.8%), ⁷⁶Ge (86.0%) и сплава, содержащего 42.7% ⁷⁰Ge и 48% ⁷⁶Ge при температуре 10 К. Установлено, что величина сдвига увеличивается с уменьшением атомной массы изотопа. Обнаружен дополнительный сдвиг и уширение полосы КРС при температуре 77 К для изотопно разупорядоченных образцов природного германия и сплава ⁷⁰Ge⁷⁶Ge. В работе [13] проведено сравнение формы полосы КРС изотопа германия ⁷⁰Ge, природного германия и сплава ⁷⁰Ge⁷⁶Ge. Для кристаллов природного Ge и сплава ⁷⁰Ge⁷⁶Ge наблюдалось дополнительное рассеяние в низкоэнергетической части основной полосы КРС, связанное с изотопным беспорядком, об уширении линий не сообщалось.

В [14] изучен спектр КРС второго порядка для германия природного изотопного состава. Установлена корреляция спектра КРС с плотностью фонных состояний, измеренной методом нейтронного рассеяния [15].

Исследование фонных спектров германия с различным значением фактора изотопной разупорядоченности проводился авторами многих работ [12,13,16–19]. Однако результаты сравнительного анализа изотопно разупорядоченного кристалла с образцом германия с такой же средней атомной массой редко встречаются в литературе.

В [16,17] представлены сравнительные данные о влиянии изотопного состава германия на спектр КРС второго порядка для изотопа ⁷⁰Ge (95.9%), сплава ⁷⁰Ge_{0.5}⁷⁶Ge_{0.5} и германия с природным изотопным составом. Сведения о спектрах КРС второго порядка для других изотопов германия в литературе отсутствуют.

Цель настоящей работы — проведение сравнительного анализа влияния изотопной разупорядоченности и средней атомной массы на фонные спектры первого и второго порядка обогащенных кристаллов германия с более высокой степенью обогащения, чем ранее исследованные образцы.

Для исследований влияния средней атомной массы были использованы образцы монокристаллов изотопов германия ⁷²Ge, ⁷³Ge и ⁷⁴Ge с более высокой степенью изотопного обогащения (более 99.9%). Для сравнительного изучения вклада изотопной разупорядоченности впервые был выращен монокристалл сплава

⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5}, имеющий практически одинаковую (различие ~ 0.0004 at.%) с ⁷³Ge среднюю атомную массу.

2. Экспериментальная часть

2.1. Характеристика исследуемых образцов изотопов германия

Изотопы ⁷²Ge, ⁷³Ge, ⁷⁴Ge получены гидридным методом, подробно описанным в [1]. Для получения образца ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5} сплавливали эквимоллярные количества изотопов ⁷²Ge и ⁷⁴Ge в тигле из высокочистого кварцевого стекла с покрытием из аморфного диоксида кремния. После расплавления загрузки ее выдерживали в течение 1 h в переменном электромагнитном поле индуктора для гомогенизации расплава. Затем расплав подвергали направленной кристаллизации методом Бриджмена.

Для изучения спектров ИК-поглощения и КРС из средней части монокристаллов вырезали плоскопараллельные пластины толщиной 1.3 mm. Обе стороны пластин были отполированы.

Содержание химических примесей в изотопно обогащенном германии по данным масс-спектрометрического анализа — менее 10^{-4} – 10^{-6} wt%. Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) проведен анализ изотопного состава исследуемых образцов германия.

Изотопная разупорядоченность характеризовалась величиной фактора *g*, который определялся по формуле (1) [17]:

$$g = \sum_i C_i [(M_i - M_{av})/M_{av}]^2, \quad (1)$$

где M_i и C_i — масса *i*-го изотопа и его концентрация.

По данным об изотопном составе исследуемых образцов рассчитаны их средняя атомная масса M_{av} и фактор изотопической разупорядоченности *g* (таблица 1).

Видно, что значение фактора *g* для сплава ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5} примерно на 3 порядка выше, чем для чистых изотопов.

2.2. Регистрация спектров ИК-пропускания и КРС германия

ИК-спектры пропускания регистрировали в области 200 – 700 cm^{-1} при температуре 298 и 15 К при помощи

ИК-Фурье-спектрометра IFS-113v, оснащенного детектором DTGS с окном из полиэтилена. Разрешение составляло 0.5 cm^{-1} . В качестве делителя луча использовалась лавсановая пленка. Источник излучения — глобар (стержень из SiC). Для охлаждения образцов до температуры 15 К использовался криостат-рефрижератор замкнутого цикла RGD 210 фирмы Leybold с окнами из KPC-5. Число накопленных сканов для последующего усреднения составляло 250.

Спектры КРС образцов монокристаллического изотопно обогащенного германия были получены с использованием комплекса ИНТЕГРА Спектра (NT-MDT, Россия) при комнатной температуре 295 К в схеме на отражение. Возбуждение осуществлялось излучением HeNe-лазера с длиной волны 632.8 nm. Излучение фокусировалось 100-кратным объективом с апертурой $NA = 0.95$. Мощность несфокусированного лазерного излучения, измеряемая с помощью кремниевого фотодетектора 11PD100-Si (Standa Ltd), составляла 1.9 mW. Детектирование спектров КРС проводилось охлаждаемой ПЗС-камерой ANDORTM в диапазоне $150\text{--}1000 \text{ cm}^{-1}$ с разрешением 0.9 cm^{-1} .

3. Результаты и обсуждение

3.1. Спектры ИК-пропускания

Результаты сравнительного исследования ИК-спектров в области фононных колебаний решетки изотопов германия ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ представлены на рис. 1. Значения частот фононов для изотопов ^{72}Ge , ^{73}Ge и ^{74}Ge увеличиваются с уменьшением их средней атомной массы. Зависимость частоты фононов от атомной массы хорошо описывается в рамках модели виртуального кристалла. Сопоставление ИК-спектров ^{73}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ показало, что положение и полуширина полос ИК-поглощения совпадают в пределах погрешности эксперимента, которая составила $< 0.1 \text{ cm}^{-1}$, т.е. влияние фактора изотопной разупорядоченности на ИК-поглощение германия при комнатной температуре не обнаружено при разрешении 0.5 cm^{-1} .

В ИК-спектрах монокристаллов ^{73}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$, полученных при низкой температуре (15 К), можно заметить, что структура некоторых полос в области двухфононного поглощения различная (рис. 2). В области поглощения фононов $(\text{TO} + \text{TA})_x$, $(\text{TO} + \text{TA})_L$ при 350 cm^{-1} положения максимумов в пределах погрешности эксперимента совпадают, наблюдается уширение в изотопно разупорядоченном $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ по сравнению с изотопно чистым ^{73}Ge . Измеренное в местах, указанных стрелками на рис. 2, значение уширения составило $1.5\text{--}3.5 \text{ cm}^{-1}$. В области поглощения фононов $(\text{LO} + \text{LA})_K$, $(\text{LO} + \text{LA})_L$ при $500\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ различий в форме полос не выявлено. Это согласуется с результатами работы [11], где показано, что дополнительное уширение линий, вызванное изотопным беспорядком, сильно зависит от энергии

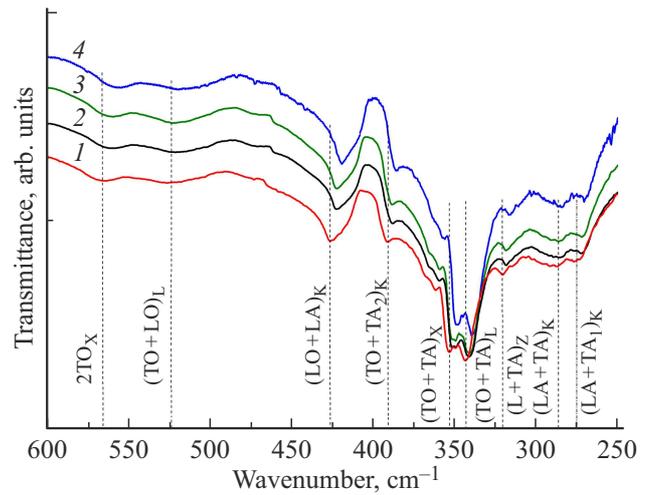


Рис. 1. ИК-спектры пропускания монокристаллов изотопов германия при $T = 298 \text{ K}$: кривая 1 — ^{72}Ge , 2 — ^{73}Ge , 3 — $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$, 4 — ^{74}Ge . Отнесение фононов [11]. Спектры сдвинуты по оси ординат для удобства.

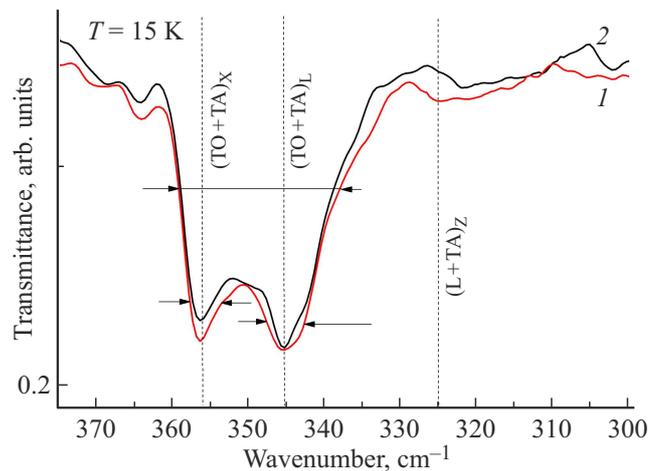


Рис. 2. ИК-спектры пропускания ^{73}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ при $T = 15 \text{ K}$. Кривая 1 — $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$, 2 — ^{73}Ge .

фононов; и только поперечные-оптические фононы в точках L, K, W и X в зоне Бриллюэна подвергаются значительному влиянию изотопного беспорядка.

Сдвиг полос, связанный с изотопным беспорядком, может больше проявляться в длинноволновой части спектра, как продемонстрировано в [11]; это подтверждается нашими экспериментальными данными. Сдвиг частоты в область коротких длин волн в $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ по сравнению с ^{73}Ge был определен нами из ИК-спектров для фонона $(\text{L} + \text{TA})_Z$, отнесенного по данным [11] (и $(\text{L} + \text{TA})_{W,X}$ по данным [15,20]), при 320 cm^{-1} составил $2.5 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$. Это значение превышает рассчитанный в [21] вклад от ангармоничности в природном германии 0.08 cm^{-1} при температуре 10 К, следовательно, можно предполагать, что природа сдвига связана с влиянием изотопной разупорядоченности. Следует отметить, что точность определения максимума была

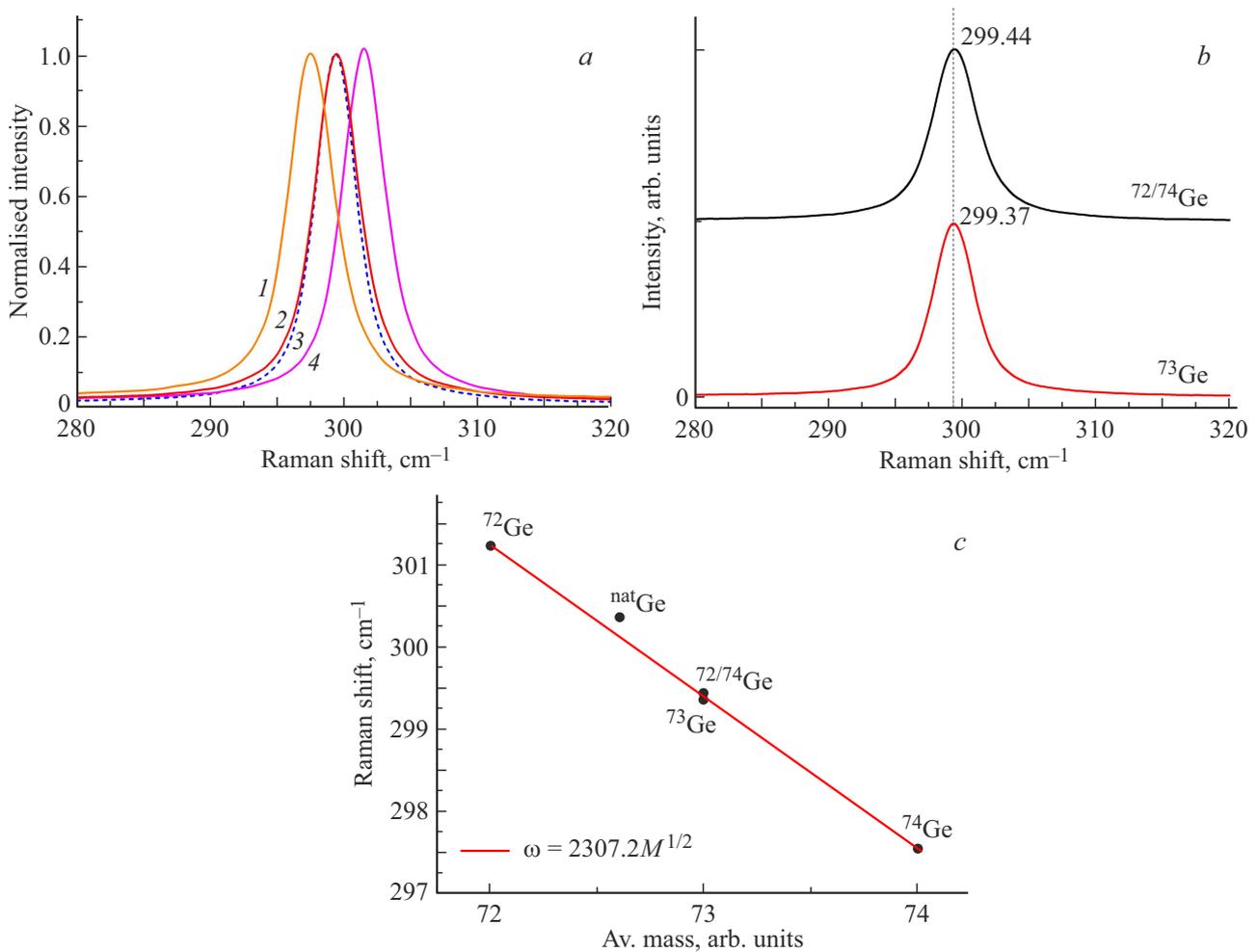


Рис. 3. *a)* Спектр КРС первого порядка изотопов германия ⁷²Ge, ⁷³Ge, ⁷⁴Ge и сплава ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5}. Кривая 1 — ⁷⁴Ge, 2 — ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5}, 3 — ⁷³Ge, 4 — ⁷²Ge; *b)* сравнение спектров комбинационного рассеяния ⁷³Ge и разупорядоченного образца сплава ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5}; *c)* частота комбинационного рассеяния как функция средней атомной массы, измеренная при 298 К, для изотопически чистых и разупорядоченных образцов Ge.

невысока у фонона $(L + TA)_Z$ из-за уровня шума и слабой интенсивности полос поглощения.

3.2. Спектры комбинационного рассеяния

Для кристаллов с алмазоподобной кристаллической решеткой, к которым относится и германий, характерно трехкратное вырождение состояний фононов в центре зоны Бриллюэна ($\mathbf{k} = 0$), которые активны в спектрах комбинационного рассеяния. На рис. 3 представлен спектр КРС первого порядка для образцов монокристаллических изотопов германия ⁷²Ge, ⁷³Ge, ⁷⁴Ge и сплава ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5}. Для получения информации о частоте максимума и полуширине полос проводилась нормировка интенсивности к единице и аппроксимация линии функцией Лоренца. Погрешность определения частоты и полуширины при такой обработке спектров не превышали 0.01 и 0.1 см⁻¹ соответственно. Точность положения пиков рамановских полос определялась инструментальной погрешностью прибора и составила 0.3 см⁻¹.

С уменьшением средней атомной массы изотопов наблюдался сдвиг полос КРС первого порядка в высокочастотную область. Зависимость положения максимумов полос от атомной массы хорошо описывается выражением $\omega \propto M^{-1/2}$. Известно, что сдвиг частот, обусловленный изотопной разупорядоченностью, пропорционален параметру g согласно выражению [12]:

$$\Delta\omega = g \frac{\omega^2}{12} \int_0^\infty \frac{1}{(\omega^2 - \omega_i^2)} N_d(\omega_i) d\omega_i, \quad (2)$$

где ω — частота оптического фонона, $N_d(\omega_i)$ — функция плотности состояний.

Значения g для образца природного Ge составляет $5.87 \cdot 10^{-4}$, для сплава ⁷²Ge_{0.5}⁷⁴Ge_{0.5} — $1.88 \cdot 10^{-4}$. Величина сдвига в спектре КРС для образца природного изотопного состава согласно [12] и нашим экспериментальным данным [7] составила ~ 0.4 см⁻¹, тогда сдвиг частоты КР оптического фонона в точке Г, вызванный изотопным беспорядком, должен быть в сплаве в 3.1 раза

Таблица 2. Значения максимумов волновых чисел фононов в спектрах КРС (рис. 4) изотопов германия и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$. Отнесение фононов [17]

Фононы	Положение максимума полос фононов, cm^{-1}			
	^{72}Ge	$^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$	^{73}Ge	^{74}Ge
2TA(X)	160.8	159.4	159.4	158.5
2TA(W-K, L-W)	230.2	228.0	228.0	226.9
TO(Γ)	301.3	299.4	299.4	297.6
TO(X)+TA(X)	353.7	351.7	351.6	350.3
2LA(K-L)	378.4	378.3	378.3	377.7
2TO(W)	552.7	547.8	550.1	545.5
2TO(L)	574.9	570.0	570.6	567.3
2O(Γ)	596.7	593.6	593.2	588.1

меньше, чем в природном Ge, т.е. 0.13 cm^{-1} . Разница в положении максимума на рис. 3 в спектрах образцов ^{73}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$, имеющих одинаковую среднюю массу, в нашей работе составила 0.07 cm^{-1} , что ниже погрешности эксперимента в 0.15 cm^{-1} .

Полуширина полос фононов в Ge определяется их временем жизни (ангармонический распад на два или более низкоэнергетических фононов) и уширением, связанным с изотопным беспорядком. Вклад в полуширину линии, возникающий из-за изотопного беспорядка, по данным [15] на два порядка меньше, чем уширение из-за ангармонического рассеяния для фононов в точке Γ , поскольку плотность фононных состояний приближается к нулю в центре зоны. Для уширения полосы первого порядка, вызванного изотопной разупорядоченностью, увеличение полуширины в сплаве должно составлять $\sim 0.005 \text{ cm}^{-1}$ [10].

$$\Gamma_{\text{isotope}} = g \frac{\pi\omega^2}{12} N_d(\omega), \quad (3)$$

где g — фактор разупорядоченности, ω — частота оптического фонона, $N_d(\omega) = D(\omega)$ — функция плотности состояний.

Спектры КР первого порядка, образцов изотопно-обогащенного монокристаллического Ge, представленные на рис. 3, показали, что зависимость ширины линий КРС от средней атомной массы в области комнатных температур не обнаруживается, в отличие от наблюдавшейся в работе [12] при температуре 10 К. Найденное нами уширение полосы КРС для образца сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$, измеренное относительно моноизотопного ^{73}Ge , составило 0.33 cm^{-1} . Это значение превышает рассчитанное нами и предсказанное в [12], и может включать, кроме добавки, связанной с ангармонизмом, часть от изотопной разнородности образцов, а также быть вызвано различными измерительными эффектами, такими как влияние толщины слоя оксидной пленки, длина волны и глубина проникновения лазера, рассмотренными в [12]. Поэтому более точно определить механизмы уширения фононных линий оптической зоны в нашем эксперименте не представляется возможным.

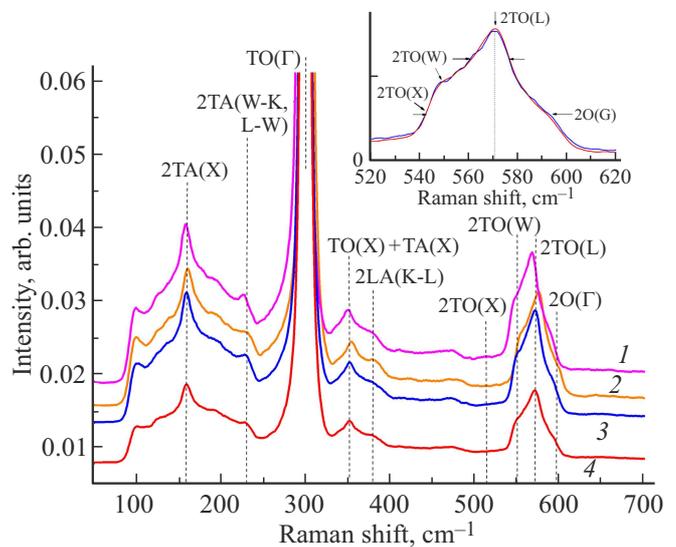


Рис. 4. а) Спектр КРС второго порядка. Плотность состояний обертонов для оптических ветвей находится в области $520\text{--}600 \text{ cm}^{-1}$ (врезка). Наблюдаемые положения пиков перечислены в таблице 2. Кривая 1 — ^{74}Ge , 2 — ^{72}Ge , 3 — ^{73}Ge , 4 — $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$.

Изучены спектры КРС 2-го порядка для монокристаллов изотопов германия, представленные на рис. 4, связанные с рассеянием фотонов посредством двухфононных процессов. В таких процессах образуются либо два фонона с одинаковыми, но противоположно направленными волновыми векторами, либо образуется один фонон, а другой при этом уничтожается. Поскольку двухфононные процессы происходят гораздо реже, чем однофононные, интенсивность обертонов второго порядка в спектре КРС в десятки раз слабее, чем у основной полосы. Из-за этого ухудшается соотношение сигнал/шум, что осложняет наблюдение и интерпретацию спектров второго порядка. Кроме того, многие полосы представляют собой комбинацию частот нескольких двухфононных состояний, имеют сложную форму, что затрудняет выделение максимумов полос. Спектр КРС 2-го порядка представлен на рис. 4.

На рис. 4 показаны частоты обертона 2-го порядка в спектрах комбинационного рассеяния изотопно чистого Ge в сравнении с неупорядоченным германиевым сплавом, обозначения которых взяты из [17]. Как и для полос комбинационного рассеяния света 1-го порядка, в спектрах 2-го порядка наблюдается смещение максимумов полос в коротковолновую область с уменьшением атомной массы. Наибольшее отношение изотопного сдвига к изменению атомной массы $\Delta\omega/\Delta M$ наблюдается в высокочастотной части спектра.

Для образцов ^{73}Ge и $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ с одинаковой атомной массой положение максимумов полос в пределах погрешности измерения совпадает, как показано на рис. 4 (врезка). Численные значения максимумов фоновых частот для монокристаллов изотопов германия и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ представлены в таблице 2.

4. Заключение

Сравнительные исследования влияния изотопной разупорядоченности на спектры ИК-пропускания в области фоновых колебаний решетки образцов монокристаллов изотопно чистых ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ проводились при комнатной (298 К) и низкой (15 К) температурах. Показано, что при комнатной температуре зависимость частот фононов от атомной массы соответствовала модели виртуального кристалла, как $\omega \propto M^{-1/2}$, без изменения формы полос, таким образом, влияния изотопной разупорядоченности не было обнаружено.

В низкотемпературных ИК-спектрах пропускания, наблюдалось уширение полос двух фоновых поглощения $(\text{TO} + \text{TA})_x$ и $(\text{TO} + \text{TA})_L$ в изотопно разупорядоченном монокристаллическом сплаве $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ по сравнению с изотопно чистым монокристаллом ^{73}Ge на $1.5\text{--}3.5\text{ cm}^{-1}$. Найденный сдвиг частоты фонона $(\text{L} + \text{TA})_Z$ на $2.5 \pm 0.5\text{ cm}^{-1}$ в область коротких длин волн для $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ по отношению к ^{73}Ge предположительно связан с влиянием изотопного беспорядка.

Изучены спектры КРС первого и второго порядка для монокристаллов изотопов германия при $T = 295\text{ K}$. Определены частоты полос КРС, максимумы полос первого и второго порядков сдвигаются в зависимости от средней атомной массы образца. Наибольшее отношение величины изотопного сдвига к изменению атомной массы $\Delta\omega/\Delta M$ наблюдается в высокочастотной части спектра. Частоты фоновых полос в спектрах комбинационного рассеяния первого и второго порядка в спектрах образцов ^{73}Ge и сплава $^{72}\text{Ge}_{0.5}^{74}\text{Ge}_{0.5}$ с одинаковой средней атомной массой совпадали в пределах погрешности измерений.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (№ ФФСР-2022-0003).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

Список литературы

- [1] M.F. Churbanov, V.A. Gavva, A.D. Bulanov, N.V. Abrosimov, E.A. Kozyrev, I.A. Andryushchenko, V.A. Lipskii, S.A. Adamchik, O.Yu. Troshin, A.Yu. Lashkov, A.V. Gusev. *Cryst. Res. Technol.* **52**, 4, 1700026 (2017).
- [2] M. Berglund, M.E. Wieser. *Pure Appl. Chem.* **83**, 2, 397 (2011).
- [3] А.В. Гусев, А.М. Гибин, И.А. Андриющенко, В.А. Гавва, Е.А. Козырев. *ФТТ* **57**, 9, 1868 (2015). [A.V. Gusev, A.M. Gibin, I.A. Andryushchenko, V.A. Gavva, E.A. Kozyrev. *Phys. Solid State* **57**, 9, 1917 (2015)].
- [4] C. Parks, A.K. Ramdas, S. Rodriguez, K.M. Itoh, E.E. Haller. *Phys. Rev. B* **49**, 20, 14244 (1994).
- [5] T.H. Geballe, G.W. Hull. *Phys. Rev.* **110**, 3, 773 (1958).
- [6] A.V. Inyushkin, A.N. Taldenkov, V.I. Ozhogin, K.M. Itoh, E.E. Haller. *Phys. Rev. B* **68**, 15, 153203 (2003).
- [7] V.A. Lipskiy, V.O. Nazaryants, T.V. Kotereva, A.D. Bulanov, V.A. Gavva, V.V. Koltashev, M.F. Churbanov, V.G. Plotnichenko. *Appl. Opt.* **58**, 27, 7489 (2019).
- [8] V.G. Plotnichenko, V.O. Nazaryants, E.B. Kryukova, V.V. Koltashev, V.O. Sokolov, A.V. Gusev, V.A. Gavva, T.V. Kotereva, M.F. Churbanov, E.M. Dianov. *Appl. Opt.* **50**, 23, 4633 (2011).
- [9] И.А. Каплунов, В.Е. Роголин, М.Ю. Гавалян. *Оптика и спектроскопия* **118**, 2, 254 (2015). [I.A. Kaplunov, V.E. Rogalin, M.Yu. Gavalyan. *Opt. Spectrosc.* **118**, 2, 240 (2015)].
- [10] В.А. Гавва, Т.В. Котерева, В.А. Липский, А.В. Нежданов. *Оптика и спектроскопия* **120**, 2, 266 (2016). [V.A. Gavva, T.V. Kotereva, V.A. Lipskiy, A.V. Nezhdanov. *Opt. Spectrosc.* **120**, 2, 255 (2016)].
- [11] H.D. Fuchs, C.H. Grein, M. Bauer, M. Cardona. *Phys. Rev. B* **45**, 8, 4065 (1992).
- [12] J.M. Zhang, M. Giehler, A. Göbel, T. Ruf, M. Cardona, E.E. Haller, K. Itoh. *Rev. B* **57**, 3, 1348 (1998).
- [13] H.D. Fuchs, P. Etchegoin, M. Cardona, K. Itoh, E.E. Haller. *Phys. Rev. Lett.* **70**, 11, 1715 (1993).
- [14] B.A. Weinstein, M. Cardona. *Phys. Rev. B* **7**, 6, 2545 (1973).
- [15] G. Nilsson, G. Nelin. *Phys. Rev. B* **3**, 2, 364 (1971).
- [16] P. Etchegoin, H.D. Fuchs, J. Weber, M. Cardona, L. Pintschovius, N. Pyka, K. Itoh, E.E. Haller. *Phys. Rev. B* **48**, 17, 12661 (1993).
- [17] H.D. Fuchs, C.H. Grein, C. Thomsen, M. Cardona, W.L. Hansen, E.E. Haller, K. Itoh. *Phys. Rev. B* **43**, 6, 4835 (1991).
- [18] H.D. Fuchs, C.H. Grein, R.I. Devlen, J. Kuhl, M. Cardona. *Phys. L Rev.* **44**, 16–15, 8633 (1991).
- [19] M. Cardona, P. Etchegoin, H.D. Fuchs, P. Molinas-Mata. *J. Phys.: Condens. Matter* **5**, 33A, A61 (1993).
- [20] F.A. Johnson, R. Loudon. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **281**, 1385, 274 (1964).
- [21] R.A. Cowley. *J. Phys. (Paris) Colloq.* **26**, 659 (1965).

Редактор Е.В. Толстякова