

ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ ФОНОННОГО СПЕКТРА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ИТТРИЙ-ЛЮТЕЦИЕВЫХ АЛЮМОГРАНАТОВ

© 2024 г. С. А. Никитов^a, А. В. Таранов^{a, *}, Е. Н. Хазанов^a, Е. В. Чарная^b,
М. В. Лихолетова^b, Е. В. Шевченко^b

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11, стр. 7, Москва, 125009 Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет,
ул. Ульяновская 1, Петродворец, Санкт-Петербург, 198504 Россия

*e-mail: taranov@cplire.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.

Измерены температурные зависимости теплоемкости и исследованы общие закономерности формирования фононного спектра монокристаллов твердых растворов иттрий-лютециевых алюмогранатов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ при $0 \leq x \leq 3$ в интервале температур от 1.9 до 220 К. По данным, полученным ниже 10 К, рассчитаны температуры Дебая. Особенности фононного спектра в промежуточной температурной области интерпретированы как суперпозиция оптических мод для иттриевого и лютециевого гранатов. Показано, что низкие значения теплоемкости, обусловленной вкладом акустических фононов, для $Y_{2.25}Lu_{0.75}Al_5O_{12}$ коррелируют с аномалиями на концентрационных зависимостях фононного транспорта, поглощения акустических волн и формы линии ЯМР алюминия.

Ключевые слова: иттрий-лютециевые алюмогранаты; теплоемкость; фононные оптические моды; порядок замещения

DOI: 10.31857/S0320791924020053, **EDN:** YNMCZS

ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллы твердых растворов иттрий-редкоземельных алюмогранатов $Y_{3-x}Re_xAl_5O_{12}$ (YAG:Re) [1] благодаря возможности контролируемого изоморфного замещения на позициях $Y \leftrightarrow Re$, а также механическим, диэлектрическим и теплофизическим свойствам нашли широкое применение в качестве базовых элементов устройств квантовой электроники [2] и адиабатического размагничивания при получении сверхнизких температур [3]. В акустике твердого тела был предложен материал с более высокой акустической прозрачностью в СВЧ диапазоне по сравнению с традиционными кристаллами корунда, кварца, ниобата лития и т.п. [4]. Это позволило создать предпосылки для конструирования миниатюрных твердотельных акустических устройств обработки информации [5, 6]. Использование алюмогранатов YAG:Re открыло новые возможности исследования процессов, лежащих в основе фонон-фононного и спин-фононного

взаимодействия, особенностей колебательного спектра диэлектрических материалов со сложной кристаллической структурой [7].

На физические свойства твердых кристаллических растворов значительное влияние оказывает характер распределения атомов компонент по узлам кристаллической решетки, который определяет тип порядка замещения для конкретных кристаллов [8]. В случае иттрий-редкоземельных алюмогранатов порядок замещения зависит от взаимного расположения ионов Y^{3+} и Re^{3+} по додекаэдрическим c -позициям в решетке [1]. Исходя из энергетических соображений, возможно формирование неупорядоченного твердого раствора, в котором вероятность отклонения концентрации твердого раствора от среднего значения x задается нормальным распределением. Если атомам компонент энергетически выгоднее быть в окружении атомов такого же сорта, то в твердом растворе возникает кластеризация. В противном случае наблюдается тенденция к формированию сверхрешетки.

Порядок замещения сильно сказывается на кинетических параметрах твердых растворов, в частности, на электропроводности смешанных полупроводников [9], фононной релаксации, затухании акустических волн и теплопроводности в диэлектриках [10].

Примитивная ячейка иттриевого алюмограната $Y_3Al_5O_{12}$ содержит 20 атомов. Это означает, что собственный колебательный спектр подобного монокристалла определяется преимущественно оптическими фононами. Оптические фононы в монокристаллах граната исследовались при значениях волновых векторов вблизи центра зоны Бриллюэна методами комбинационного рассеяния света и инфракрасной спектроскопии [11, 12], а также методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН) [13–15]. В работе [13] акустические моды фононного спектра $Y_3Al_5O_{12}$ наблюдались до $\sim 110\text{--}120\text{ см}^{-1}$ ($\sim 14\text{ мэВ}$) при 750 К, что согласовывалось с оценкой границы спектра акустических колебаний [16]. Теоретические исследования [17, 18] показали, что изоморфное замещение Y более тяжелым редкоземельным атомом Re может приводить к образованию дополнительных колебательных состояний в акустической части фононного спектра YAG:Re.

Твердые растворы иттрий-лютециевых алюмогранатов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ стоят особняком в ряду остальных YAG:Re из-за того, что оба иона Y^{3+} и Lu^{3+} непарамагнитны. Исследования фононного спектра нелегированных парамагнитными ионами кристаллов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ методом НРН [15] и ряд последующих экспериментов по распространению акустических волн СВЧ-диапазона [19] и тепловых импульсов в области гелиевых температур, а также исследования ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [20] выявили сложную зависимость физических свойств и порядка замещения от концентрации x . В последнее время твердые растворы иттрий-лютециевых алюмогранатов активно изучаются для различных практических применений, например, их использование позволяет оптимизировать характеристики наносцинтилляторов на основе $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}:Ce^{3+}$ [21].

В связи с тем, что при образовании твердых растворов замещения существенно изменяется фононный спектр, целесообразно рассмотреть свойства монокристаллов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$, которые могут отражать эти изменения. Одним из таких свойств является теплоемкость. Отсутствие парамагнитных ионов в решетке $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ позволяет исследовать характер трансформации фононного спектра методом теплоемкости в широком диапазоне температур без учета влияния аномалий Шоттки, индуцируемых остальными редкоземельными ионами [22].

Для кристаллического $Y_3Al_5O_{12}$ данные по теплоемкости в широком интервале температур представлены в работах [23] и при температурах выше 80 К в

работах [24–26]. Для монокристаллов лютециевого граната $Lu_3Al_5O_{12}$ проводились измерения теплоемкости выше 80 К [25], а для монокристаллов твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$, насколько нам известно, измерения теплоемкости отсутствуют.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы гранатов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ ($x = 0, 0.6, 0.75, 1.0, 2.5$ и 3) были синтезированы во ВНИИСМС (г. Александров) методом горизонтальной направленной кристаллизации (метод Бриджмана). Гранаты имеют пространственную симметрию $Ia\bar{3}d$. Образцы для исследований вырезались в виде пластинок, ориентированных перпендикулярно кубической оси кристаллов, толщиной около 0.3 мм и площадью поверхности около 0.2 см².

Измерения теплоемкости проводились на базе Ресурсного центра “Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники” научного парка СПбГУ с помощью встроенной опции комплекса для измерения физических свойств PPMS-9+EverCool-II производства Quantum Design в соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве. Измерения проводились в температурном диапазоне от 1.9 до 220 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены измеренные температурные зависимости теплоемкости $C(T)$ для монокристаллов твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$

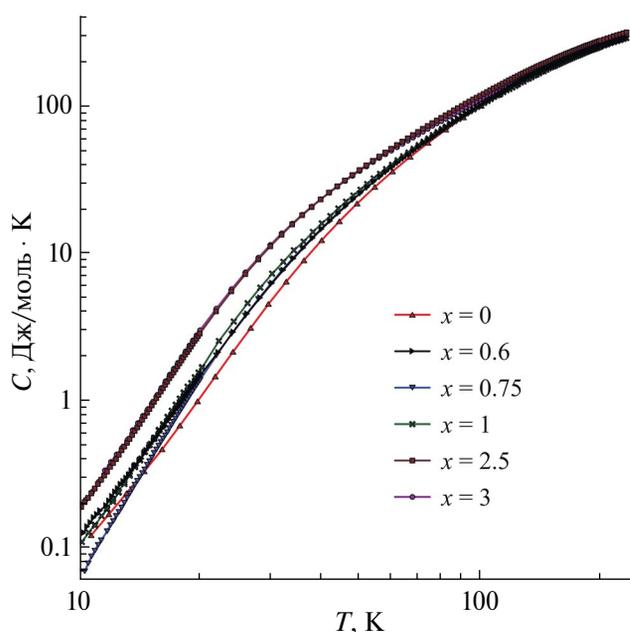


Рис. 1. Температурные зависимости теплоемкости C в монокристаллах твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$.

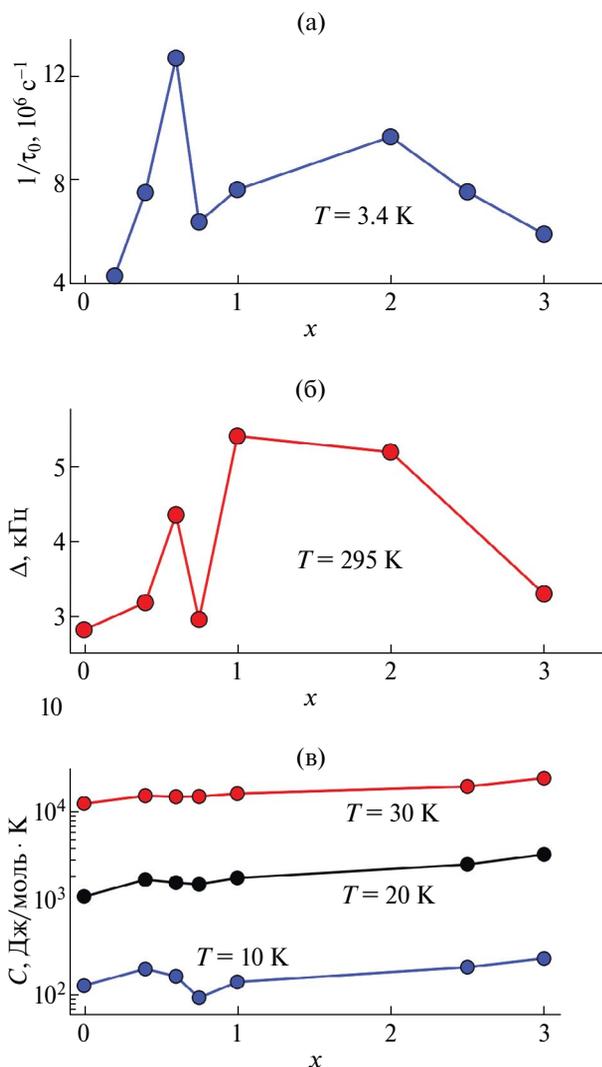


Рис. 2. Концентрационные зависимости в монокристаллах твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$: (а) — обратного времени рассеяния фононов тепловых частот $1/\tau_0$ [19]; (б) — ширины линии ЯМР ^{27}Al [20]; (в) — теплоемкости.

в диапазоне от 10 до 220 К. Эти зависимости отражают трансформацию фононного спектра при переходе от иттриевого ($x = 0$) к лютециевому ($x = 3$) алюмогранату. При температурах выше 15 К минимальная теплоемкость наблюдается для иттриевого граната. Теплоемкость возрастает с ростом концентрации лютеция.

Однако при более низких температурах минимальную теплоемкость демонстрирует твердый раствор с $x = 0.75$. Такое поведение коррелирует с результатами исследований кристаллов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ акустическими методами, методом тепловых импульсов и ЯМР [19, 20]. На рис. 2 данные, полученные в этих работах, сопоставлены

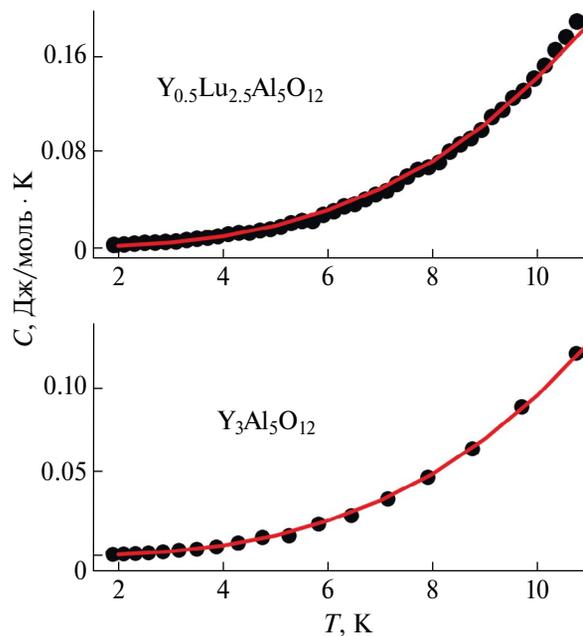


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и теоретические (линии) температурные зависимости теплоемкости C твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$.

с данными по теплоемкости из настоящей работы. Видно, что для кристалла с $x = 0.75$ наблюдаются anomalous понижение упругого рассеяния тепловых фононов, сужение линии ЯМР ^{27}Al и понижение теплоемкости на фоне концентрационных зависимостей этих величин.

В работе [20] было предположено, что сужение линии ЯМР ^{27}Al является результатом отклонения характера размещения ионов Y^{3+} и Lu^{3+} по c -узлам решетки гранатов от нормального закона и проявлением тенденции к возникновению сверхрешетки. Частичный порядок замещения, в свою очередь, приводит к увеличению времени жизни фононов при низких температурах и к уменьшению поглощения акустических волн при более высоких температурах, когда существенную роль начинает играть фонон–фононное рассеяние. Исследования теплоемкости, проведенные в данной работе, показывают, что частичное формирование сверхрешетки проявляется также и в снижении теплоемкости при низкой температуре. Возможно, что понижение теплоемкости обусловлено уменьшением числа акустических фононов из-за увеличения размеров примитивной ячейки.

Измерения теплоемкости при низких температурах позволяют провести оценки температуры Дебая θ согласно выражению (1), где r_D — число фононных мод, равное 60 для решетки граната, и R — газовая постоянная:

Таблица. Значения температур Дебая для твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ и относительный вклад α эйнштейновских мод, соответствующих локальным колебаниям ионов Y^{3+} и Lu^{3+} .

x	0	0.6	0.75	1	2.5	3
θ , К	750	700	850	750	650	590
α	1/0	0.70/0.30	0.67/0.33	0.46/0.54	0.10/0.90	0/1

$$C(T) = 3r_D R \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 \int_0^{\frac{\theta}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx. \quad (1)$$

Примеры теоретических и экспериментальных температурных зависимостей теплоемкости показаны на рис. 3 для чистого YAG и твердого раствора с $x = 2.5$.

Полученные значения температур Дебая сведены в таблице.

Температура Дебая для YAG близка к величине 760 К, найденной в работе [25] по измерениям теплоемкости в температурном интервале от 80 до 300 К. Тогда как температура Дебая, полученная в настоящей работе для лютециевого граната, значительно ниже, чем найденная в работе [25] (750 К). В таблице обращает на себя внимание высокая температура Дебая для твердого раствора с $x = 0.75$, которая, возможно, также связана с частичным порядком замещения ионами Y^{3+} и Lu^{3+} узлов кристаллической решетки, как и остальные свойства (см. рис. 2).

На рис. 4 представлены температурные зависимости теплоемкости $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$, деленной на T^3 , в диапазоне от 10 до 100 К, в котором наблюдаются максимумы, обусловленные отличиями спектра колебательных состояний кристаллов гранатов от дебаевской модели. Максимумы кривых C/T^3 смещаются с ростом концентрации лютеция в сторону меньших температур и несколько уширяются для твердых растворов по сравнению с крайними составами.

Природа и положение максимумов на рис. 4 допускают интерпретацию при сопоставлении с данными НРН в подобных образцах твердых растворов [15]. Согласно [15], особенности колебательных состояний с энергиями 12.3 и 18 мэВ в спектрах НРН отвечают оптическим колебаниям, связанным с движением ионов Lu^{3+} в лютециевом гранате и Y^{3+} в YAG. Часть фононного спектра с энергиями выше 50 мэВ, которая определяется колебаниями тетраэдра AlO_4 , оставалась неизменной. Близкие по энергиям колебания, локализованные в области 130 и 180 К для монокристаллов $Y_{2.7}Lu_{0.3}Al_5O_{12}$ и $Y_{0.5}Lu_{2.5}Al_5O_{12}$ соответственно, были получены из данных по поглощению акустических волн СВЧ-диапазона [19]. Из этого следует, что характер зависимостей C/T^3 для твердых растворов

$Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ может быть обусловлен суперпозицией оптических колебательных состояний ионов Y^{3+} и Lu^{3+} . Вклад оптических мод в теплоемкость может быть описан на основе модели Эйнштейна [22]:

$$C_E(T) = r_E R \left(\frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\theta_E}{T}}}{\left(e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1 \right)^2}, \quad (2)$$

где θ_E – температура Эйнштейна и r_E – число колебательных мод, учитываемых в модели. Результаты аппроксимации кривых C/T^3 эйнштейновской моделью с температурами θ_E , равными 137 К для лютециевого граната и 200 К для YAG, представлены на рис. 4. Для твердых растворов кривые на рис. 4 аппроксимировались суперпозицией вкладов мод Эйнштейна для ионов Y^{3+} и Lu^{3+} . Отношение α коэффициентов r_E для мод с температурами Эйнштейна 137 и 200 К приведено в таблице. Отметим, что найденные в настоящей работе температуры

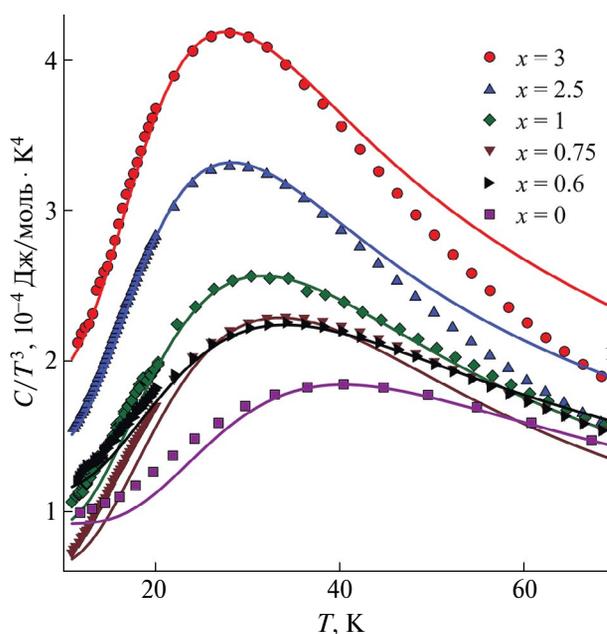


Рис. 4. Зависимости C/T^3 для $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ (символы) и их аппроксимация (линии) на основе модели Эйнштейна.

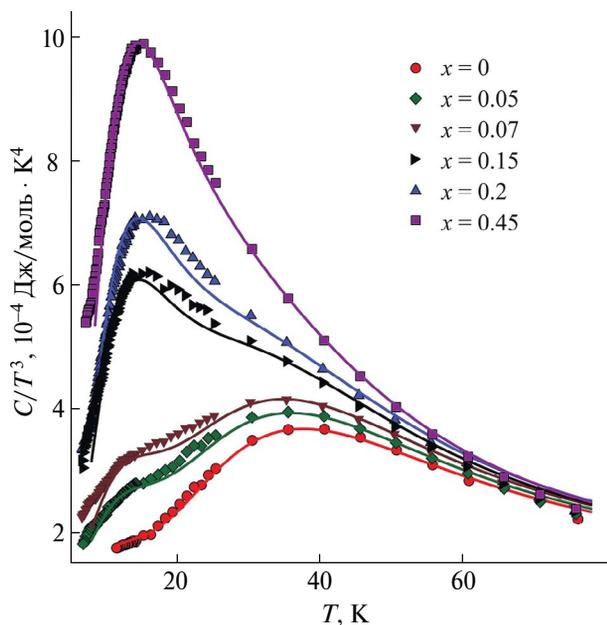


Рис. 5. Зависимости C/T^3 для $Y_{1-x}Er_xAlO_3$ (символы) и их аппроксимация (линии) на основе модели Эйнштейна.

Эйнштейна близки к величинам, полученным в работах [15, 19].

Модель, основанную на суперпозиции оптических мод, можно также применить для интерпретации зависимостей C/T^3 в кристаллах твердых растворов алюминатов $Y_{1-x}Er_xAlO_3$ ($x = 0.05, 0.07, 0.15, 0.2, 0.45$). Результаты исследования теплоемкости в этих кристаллах частично представлены в [27]. Экспериментальные данные для C/T^3 и их аппроксимация суперпозицией вкладов эйнштейновских мод для ионов Y^{3+} и Er^{3+} показаны на рис. 5.

Температуры Эйнштейна для оптических колебаний принимались равными 190 и 70 К для Y^{3+} и Er^{3+} соответственно. Рис. 5 демонстрирует хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными зависимостями. Отметим, что предельная частота колебаний иттрия в решетке иттриевого алюмината $YAlO_3$ (190К) близка к частоте оптических колебаний в YAG .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты измерений температурных зависимостей теплоемкости $C(T)$ для монокристаллов твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ ($x = 0, 0.6, 0.75, 1.0, 2.5$ и 3) в диапазоне от 10 до 220 К. Показано, что зависимости отражают трансформацию фононного спектра при переходе от иттриевого $Y_3Al_5O_{12}$ к лутециевому $Lu_3Al_5O_{12}$ алюмогранату. Характер зависимости C/T^3 для твердых растворов $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ обусловлен суперпозицией

оптических колебательных состояний ионов Y^{3+} и Lu^{3+} . Значение теплоемкости возрастает по мере роста концентрации лутеция. При температурах выше 15 К минимальная теплоемкость наблюдается для $Y_3Al_5O_{12}$. При более низких температурах для твердого раствора с концентрацией Lu $x = 0.75$ происходит достаточно резкое понижение теплоемкости, при этом данной концентрации соответствует наиболее высокая температура Дебая. Данная "аномалия" коррелирует с результатами исследований рассеяния тепловых фононов, поглощения акустических волн и спектров ЯМР ^{27}Al в $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$. Согласно данным ЯМР, аномалия, как и остальные свойства, связана с частичным порядком замещения ионами Y^{3+} и Lu^{3+} узлов кристаллической решетки. Исследования теплоемкости, проведенные в данной работе, показывают, что понижение теплоемкости при низкой температуре также может являться следствием частичного упорядочения замещения.

Исследования выполнялись в рамках Государственного задания.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта АААА А19-119091190094-6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский А.А. Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.
2. Каминский А.А., Таранов А.В., Хазанов Е.Н., Акчурин М.Ш. Особенности структуры диэлектрических лазерных оксидных керамик // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. С. 880–886.
3. Kuz'mints M.D., Tishin A.M. Magnetic refrigerants for the 4.2–20 K region: garnets or perovskites? // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 2039–2044.
4. Ivanov S.N. The Use of Yttrium-Rare Earth Aluminium Garnet Solid Solutions for Bulk-Acoustic-Wave (BAW) Devices // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1992. V. 39. P. 653–656.
5. Hickernell F.S. -3- Surface acoustic wave technology macrosuccess through microseisms, Physical Acoustics. Academic Press, 1999. V. 24. P. 135–207.
6. Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С. Акустоэлектроника: История, современное состояние и новые идеи для новой эры // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101–110.
7. Никитов С.А., Таранов А.В., Хазанов Е.Н. Фононная спектроскопия твердых диэлектриков // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 1. С. 41–55.
8. Займан Дж. Модели беспорядка. М.: Мир, 1982. 592 с.
9. Козырев С.В., Маслов А.Ю. Влияние флуктуаций состава твердых растворов на подвижность двумерного электронного газа в полупроводниковых гетероструктурах // ФТП. 1988. Т. 22. № 3. С. 433–438.

10. Ефищенко П.Ю., Чарная Е.В. Фононная релаксация, теплопроводность и затухание ультразвука в частично упорядоченных смешанных кристаллах // ФТТ. 1990. Т. 32. № 8. С. 2436–2440.
11. Hurrell I.P., Porto S.P.S., Chang I.F., Mitrar S.S., Vanman R.P. Optical phonons of yttrium aluminum garnet // Phys. Rev. 1968. V. 173. P. 851–855.
12. Mace G., Schaack G., Toaning N.G., Koningstein I.A. Optical phonons of terbium-, dysprosium-, and ytterbium-garnet // Z. Phys. 1970. V. 230. P. 391–402.
13. Васильевич А.А., Горбачев Б.И., Зотеев О.Е., Иванецкий П.Г., Кротенко В.Т., Минков Б.И., Пасечник М.В., Сазонова С.А., Скоробогатов Б.С., Слисенко В.И. // ФТТ. 1976. Т. 18. С. 3195.
14. Морозов С.И., Данилкин С.А., Закуркин В.В. Препринт ФЭИ-1130. Обнинск: Физико-энергетический институт, 1980.
15. Морозов С.И., Данилкин С.А., Закуркин В.В., Иванов С.Н., Медведь В.В., Ахметов С.Ф., Давыдченко А.Г. Спектры неупругого рассеяния медленных нейтронов и распространение акустических волн в твердом растворе $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ // ФТТ. 1983. Т. 25. № 4. С. 1135–1142.
16. Slack G.A., Oliver D.W. Thermal conductivity of garnets and phonon scattering by rare-earth ions // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. P. 592–608.
17. Казан Ю.М., Иосилевский Я.А. Эффект Моссбауэра для примесного ядра в кристалле I // Журн. эксп. теор. физ. 1962. Т. 42. № 1. С. 259–272.
18. Brout R., Wisscher W.W. Suggested Experiment on Approximate Localized Modes in Crystals // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. P. 54.
19. Иванов С.Н., Медведь В.В., Котелянский И.М., Хазанов Е.Н. Резонансное фонон-примесное рассеяние в твердых растворах $(Y_{1-c}Lu_c)_3Al_5O_{12}$ // ФТТ. 1986. Т. 28. № 10. С. 2941–2945.
20. Eftitsenko P.Y., Hazanov E.N., Ivanov S.N., Medved V.V., Tcharnaya E.V. Phonon-impurity scattering in solid solution of Yttrium-Lutetium Aluminium Garnets // Phys. Lett. A. 1990. V. 147. № 2–3. P. 135–138.
21. Mekki H., Guerbous L., Bousbia-salah H., Boukerika A., Lebbou K. Scintillation properties of $(Lu_{1-x}Y_x)_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ nanoscintillator solid solution garnet materials // JINST. 2023. V. 18. P. 02007.
22. Tari A. The specific heat of matter at low temperatures. London: Imperial College Press, 2003. 339 p.
23. Konings R.J.M., van der Laan R.R., van Genderen A.C.G., van Miltenburg J.C. The heat capacity of $Y_3Al_5O_{12}$ from 0 to 900 K // Thermochim. Acta. 1998. V. 313. P. 201–206.
24. Sato Y., Taira T. Study on the specific heat of $Y_3Al_5O_{12}$ between 129 K and 573 K // Opt. Mater. Express. 2021. V. 11. № 2. P. 551–558.
25. Aggarwal R.L., Ripin D.J., Ochoa J.R., Fan T.Y. Measurement of thermo-optic properties of $Y_3Al_5O_{12}$, $Lu_3Al_5O_{12}$, $YAlO_3$, $LiYF_4$, $LiLuF_4$, BaY_2F_8 , $KGd(WO_4)_2$, and $KY(WO_4)_2$ laser crystals in the 80–300 K temperature range // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 103514.
26. Sagi S., Hayun S. High-temperature heat capacity of SPS-processed $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) and Nd:YAG // J. Chem. Thermodyn. 2016. V. 93. P. 123–126.
27. Лезова И.Е., Карбань О.В., Таранов А.В., Хазанов Е.Н., Чарная Е.В. Кинетические характеристики фононов и структурные неоднородности твердых растворов моноалюминатов $Y_{1-x}Er_xAlO_3$ // Журн. эксп. теор. физ. 2020. Т. 157. № 1. С. 90–96.

Heat Capacity and Features of the Phonon Spectrum of Single Crystals of Solid Solutions of Yttrium-Lutetium Alumogarnates

S. A. Nikitov¹, A. V. Taranov¹, *, E. N. Khazanov¹, E. V. Charnaya²,
M. V. Likholetova², E. V. Shevchenko²

¹Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov RAS,
st. Mokhovaya 11, build. 7, Moscow, 125009 Russia

²St. Petersburg State University, Faculty of Physics. st. Ulyanovskaya 1, Petrodvorets, St. Petersburg, 198504 Russia

*e-mail: taranov@cplire.ru

The temperature dependences of the heat capacity were measured and the general patterns of the formation of the phonon spectrum of single crystals of solid solutions of yttrium-lutetium aluminum garnets $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$ at $0 < x < 3$ were studied in the temperature range from 1.9 to 220 K. Based on the data obtained below 10 K, the Debye temperatures were calculated. Features of the phonon spectrum in the intermediate temperature region are interpreted as a superposition of optical modes for yttrium and lutetium garnets. It is shown that low values of the heat capacity due to the contribution of acoustic phonons for $Y_{2.25}Lu_{0.75}Al_5O_{12}$ correlate with anomalies in the concentration dependences of phonon transport, absorption of acoustic waves, and the NMR line shape of aluminum.

Keywords: yttrium-lutetium aluminum garnets; heat capacity; phonon optical modes; replacement order