

УДК 538.913

Захаров П.В.^{1,2}, Старостенков М.Д.², Ерёмин А.М.¹

ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВСЕСТОРОНННЕГО РАСТЯЖЕНИЯ-СЖАТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНОГО БРИЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ Pt_3Al

В данной работе методом молекулярной динамики изучается влияние упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия кристалла упорядоченного сплава Pt_3Al на его фононный спектр и на характеристики щелевого дискретного бризера. Получены зависимости времени жизни дискретного бризера, его частоты, амплитуды и энергии от величины упругой деформации. Построены аналитические асимптотические оценки для частоты, максимальной амплитуды и максимальной энергии дискретного бризера при упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия кристалла Pt_3Al . Показано, что частота дискретного бризера линейно связана с величиной деформации кристалла, причем, деформация всестороннего растяжения (сжатия) приводит к уменьшению (росту) его частоты.

Ключевые слова: молекулярная динамика, дискретный бризер, фононный спектр, упругая деформация.

In this paper, the method of molecular dynamics is employed to study the effect of the hydrostatic elastic strain on the phonon spectrum and on the characteristics of gap discrete breathers in Pt_3Al ordered alloy. The dependences of the lifetime, frequency, maximal amplitude, and maximal energy of the discrete breather on the value of the elastic strain are obtained. Fitting analytical approximations for the frequency, maximal amplitude, and maximal energy of the discrete breather are given as the functions of the elastic strain of the Pt_3Al crystal. It is shown that the discrete breather frequency is linearly related to the magnitude of deformation of the crystal and tensile (compressive) deformation leads to a decrease (increase) of the frequency.

Keywords: molecular dynamics, discrete breather, phonon spectrum, elastic strain.

Введение

В последние годы большой интерес вызывает исследование дискретных бризеров (ДБ) в конденсированных средах. ДБ – это пространственно-локализованные, строго периодические колебательные моды большой амплитуды в нелинейных решёточных системах [1, 2]. Возможность существования таких колебательных мод была доказана математически для целого ряда нелинейных дискретных систем. ДБ не излучают энергию в виде малоамплитудных волновых пакетов потому, что их частота лежит вне спектра малоамплитудных колебаний дискретной системы. Однако в реальных кристаллах следует говорить о квази-бризерах, имеющих конечное время жизни и нестрогую периодичность колебаний во времени [3]. Исследуемые в данной работе квази-бризеры для краткости будут называться ДБ.

Предполагается, что ДБ участвуют в различных процессах в твёрдых телах. Существу-

ют экспериментальные свидетельства возникновения таких локализованных возбуждений в различных физических системах, включая решетки спинов в антиферромагнетиках [4], решетки связанных нелинейных оптических волноводов [5], ансамбли микромеханических осцилляторов [6].

ДБ можно разделить на два типа по характеру зависимости их частоты от амплитуды [7]. Принято выделять ДБ с мягким типом нелинейности и ДБ с жестким типом нелинейности. У ДБ мягкого типа частота уменьшается с увеличением его амплитуды (такие ДБ могут существовать только в кристаллах, имеющих щель в фононном спектре: их частота лежит в щели фононного спектра и поэтому их называют щелевыми), а у ДБ жесткого типа происходит обратное (они могут иметь частоты, как в щели, так и выше фононного спектра). ДБ с мягким типом нелинейности могут возбуждаться в биатомных кристаллах, например, в $NaCl$ [7], Pt_3Al [8-18], а также в графене и графене

[19-28]. Бризеры с жестким типом нелинейности существуют в чистых металлах с ГЦК-, ОЦК-, ГПУ- структурах.

Влияние упругой деформации на свойства ДБ изучалось ранее для графена и графеновых нанолент [19-23], а также для кристалла со структурой NaCl [29].

Целью данной работы является установление влияния упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия кристалла Pt_3Al на характеристики ДБ.

В качестве метода исследования в нашей работе выбран метод молекулярной динамики. Выбор метода обусловлен рядом фактором. ДБ весьма затруднительно наблюдать в натурном эксперименте в виду того, что они не являются топологическими дефектами, имеют время жизни порядка нескольких тысяч периодов атомных колебаний, что составляет около 0,1 нс, кроме того, в металлах они могут перемещаться со значительными скоростями. В то же время, компьютерное моделирование стало весьма продуктивным методом исследования в физике конденсированного состояния и в материаловедении. Этот факт обусловлен постоянным ростом мощности и доступности вычислительных машин, разработкой и программной

реализацией численных методов. Одним из наиболее эффективных методов изучения ДБ является метод молекулярной динамики, опирающийся на хорошо апробированные межатомные потенциалы. Говоря более подробно о методе молекулярной динамики, следует отметить, что он позволяет решать задачи, касающиеся проблем структурно энергетических трансформаций, как в кристаллических, так и в некристаллических материалах. Кроме того, данный метод позволяет рассчитать многие свойства системы, как термодинамические (например, энергию, давление, энтропию), так и кинетические (коэффициенты диффузии, частоты колебаний атомов). Причем в данном методе динамика процессов исследуется в реальном времени.

1. Описание модели и методика эксперимента

Рассматриваемая модель представляла собой объемный кристалл стехиометрии A_3B , атомы которого взаимодействовали посредством парного потенциала Морзе:

$$U_{PQ}(r_{ij}) = D_{PQ} b_{PQ} \exp(-a_{PQ} r_{ij}) (b_{PQ} \exp(-a_{PQ} r_{ij}) - 2), \quad (1)$$

где D – энергетический параметр, соответствующий глубине потенциальной ямы, a – параметр, определяющий жесткость межатомных связей, r_0 – некоторое усредненное равновесное

расстояние по координационным сферам, в которых учитывается взаимодействие между атомами. Для сплава Pt_3Al его параметры взяты из [8]:

$$D_{AlAl} = 0,318 \text{ эВ}, b_{AlAl} = 27,4979, a_{AlAl} = 1,02658 \text{ \AA}^{-1}, D_{PtPt} = 0,710 \text{ эВ}, b_{PtPt} = 102,89, \\ a_{PtPt} = 1,582 \text{ \AA}^{-1}, D_{PtAl} = 0,5048 \text{ эВ}, b_{PtAl} = 63,124, a_{PtAl} = 1,3501 \text{ \AA}^{-1},$$

которые вычислялись по стандартной методике [9, 10] из условий:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^z h_i U_{V=V_0} = E_S, \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z h_i \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{V=V_0} = 0, -V_0 \cdot \left(\frac{\partial P_s}{\partial V} \right) = K_0. \quad (2)$$

Здесь E_S – энергия сублимации атомов кристалла при нуле Кельвин; K_0 – объемный модуль упругости; P_s – давление изоэнтропического сжатия; V_0 и V – удельные объемы в начальном и деформированном состоянии; h_i – число атомов в i -ой координационной сфере; массы атомов платины и алюминия: $m_{Pt} = 195,23$ а.е.м., $m_{Al} = 26,97$ а.е.м.; постоянная кристаллической решетки: $a_0 = 3,99 \text{ \AA}$.

Выбор сплава состава A_3B (как частный случай Pt_3Al) для исследований обусловлен ря-

дом факторов. Сплавы стехиометрии A_3B со сверхструктурой $L1_2$ являются самыми многочисленными, поиск известных в настоящее время систем, обладающих $L1_2$ структурой, позволил выявить порядка 190 таких фаз в области состава A_3B . Также сплавы с данной структурой являются наиболее часто модельными и выбираются для фундаментальных исследований с целью разработки структурно-физических основ создания новых конструкционных и функциональных материалов с различными уникальными свойствами. Сплавы с

$L1_2$ структурой являются основой разработки существующих в настоящее время суперсплавов [29].

Трехмерная расчетная ячейка Pt_3Al содержала 7200 атомов. Нами проводилась упругая деформация всестороннего растяжения-сжатия ячейки кристалла Pt_3Al , причем величина этой деформации варьировалась от 1 до 10 %.

2. Результаты и обсуждение

Деформация кристалла приводит к существенным изменениям характеристик ДБ. На рис.1 и 2 показаны зависимости частоты колебаний ДБ, а также его времени жизни от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия.

Увеличение упругой деформации сжатия приводит к увеличению частоты колебаний ДБ, а увеличение упругой деформации растяжения приводит к уменьшению частоты колебаний ДБ.

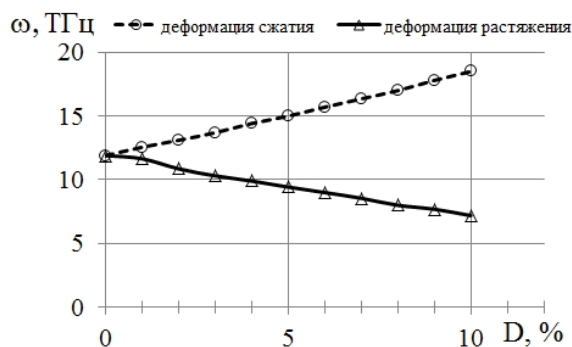


Рис.1. Зависимость частоты колебаний ω (в ТГц) дискретного бризера от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия D (в %) ячейки кристалла Pt_3Al

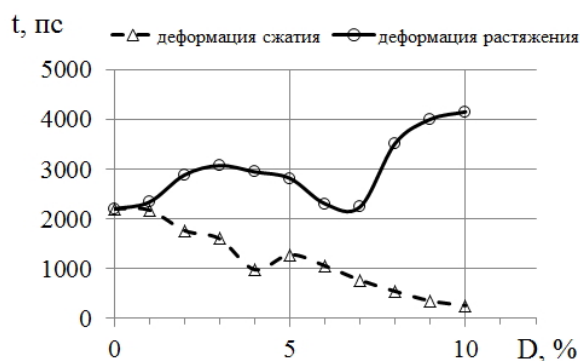


Рис.2. Зависимость времени жизни t (в пс) дискретного бризера от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия D (в %) ячейки кристалла Pt_3Al

Отметим, что частота ДБ как функция деформации с хорошей точностью может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Для упругой деформации растяжения эта зависимость имеет вид:

$$\omega = -0,5295 D + 12,27, \quad (3)$$

а для упругой деформации сжатия:

$$\omega = 0,6627 D + 11,768. \quad (4)$$

Упругая деформация всестороннего растяжения-сжатия ячейки кристалла Pt_3Al существенно влияет на время жизни ДБ. Отмечая общий характер зависимости времени жизни ДБ от величины упругой деформации (см. рис.2) можно говорить о том, что увеличение величины упругой деформации сжатия уменьшает время жизни ДБ, а увеличение величины упругой деформации растяжения увеличивает время жизни ДБ. Например, для упругой деформации растяжения равной 10 % время жизни ДБ порядка 4150 пс, а для той же величины упругой деформации сжатия порядка 258 пс.

Для существования ДБ в первую очередь важно распределение фоновых мод, т.е. фоновый спектр кристалла. Для изучения влияния деформации на фоновый спектр кристалла производился нагрев ячейки до 5 К, далее фиксировались частоты колебаний ячейки, и строилось соответствующее распределение [30]. Такой подход предпочтительнее теоретическому расчету фонового спектра, т.к. обеспечивается данными непосредственно с модели при конечных малых температурах, что не всегда можно учесть в деформированном кристалле.

Имеющийся локальный минимум на кривой для зависимости влияния деформации растяжения на время жизни, может свидетельствовать о характерном изменении фонового спектра кристалла при данной величине деформации. На рис.3 показаны фоновые спектры ячейки кристалла Pt_3Al при различных значениях упругой деформации растяжения и сжатия.

При деформации сжатия оптическая ветвь фонового спектра сдвигается в сторону больших частот, при деформации растяжения – в сторону меньших частот.

На рис.5 и 6 показаны зависимости амплитуды колебаний ДБ, а также его энергии от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия.

Из рис.4 видно, что при увеличении упругой деформации растяжения энергия ДБ падает,

а при увеличении упругой деформации сжатия растёт. По аналогии с аналитической асимптотической оценкой частоты энергия ДБ как функция деформации с хорошей точностью может быть аппроксимирована линейной зави-

симостью. Для упругой деформации растяжения эта зависимость имеет вид:

$$E = -0,0576 D + 1,1687, \quad (5)$$

а для упругой деформации сжатия:

$$E = 0,0784 D + 1,136. \quad (6)$$

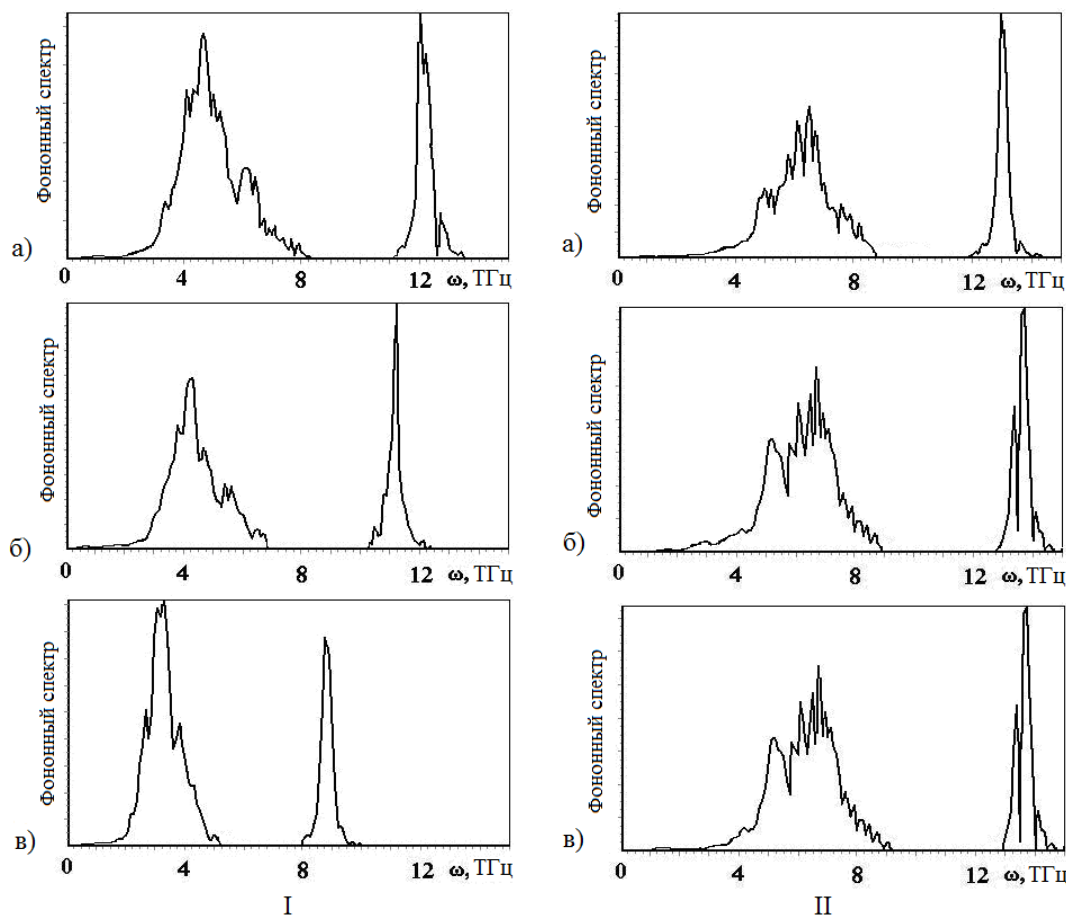


Рис.3. Фононные спектры кристалла Pt_3Al , I) при упругой деформации гидростатического растяжения: а) 1 %, б) 3 %, в) 8%; II) при упругой деформации сжатия: а) 1 %, б) 2 %, в) 3%

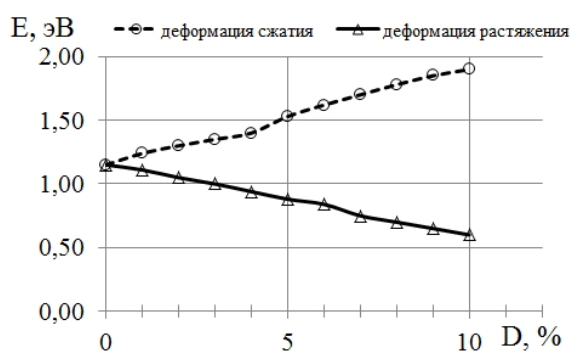


Рис.4. Зависимость энергии E (в эВ) дискретного бризера от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия D (в %) ячейки кристалла Pt_3Al

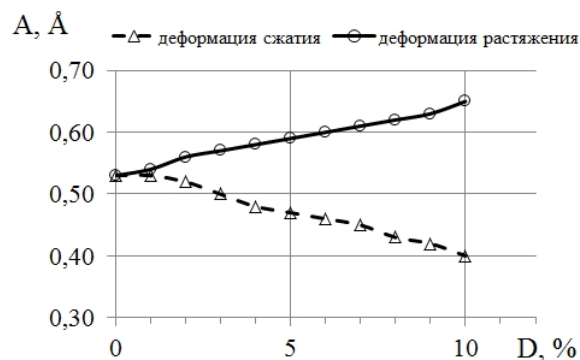


Рис.5. Зависимость амплитуды колебаний A (в Å) дискретного бризера от величины упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия D (в %) ячейки кристалла Pt_3Al

Из рис.5 видно, что при увеличении упругой деформации растяжения амплитуда коле-

баний ДБ растёт, а при увеличении упругой деформации сжатия падает. Линейная аппрок-

симация амплитуды как функции упругой деформации растяжения имеет вид:

$$A = 0,0111 D + 0,534, \quad (7)$$

а для упругой деформации сжатия:

$$A = -0,0141 D + 0,5433. \quad (8)$$

В качестве примера на рис. 6 показана зависимость энергии E (в эВ) ДБ от времени расчёта t (в пс) для упругой деформации растяжения равной 5 %. Все зависимости энергии ДБ от времени расчёта имеют характерный вид одной ветви перевёрнутой цепной линии.

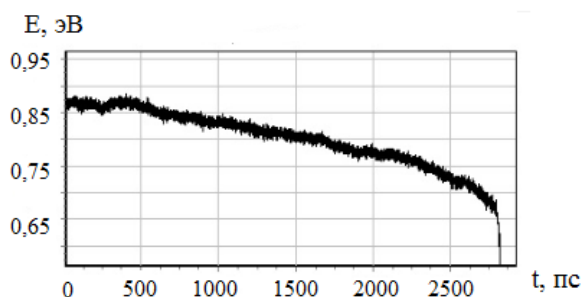


Рис. 6. Зависимость энергии E (в эВ) дискретного бризера от времени расчёта t (в пс) для упругой деформации растяжения равной 5 %

Полученные зависимости энергии дискретного бризера от величины деформации также показывают, что при деформации всестороннего сжатия энергия ДБ возрастает, а при деформации растяжения уменьшается. Полученные данные свидетельствуют, что отношение энергии ДБ при которой происходит его разрушение, к начальной энергии сохраняется и составляет величину порядка 0,77-0,8. Это означает, что разрушение ДБ происходит после рассеивания 20-23% энергии в течение его времени его существования, а 77-80% рассеивается в процессе разрушения ДБ.

Заключение

Методом молекулярной динамики рассмотрено влияние упругой деформации всестороннего растяжения-сжатия ячейки кристалла Pt_3Al на характеристики ДБ. Это позволило выяснить, что даже деформация незначительной величины существенно влияет на характеристики ДБ. Выявлены зависимости времени жизни дискретного бризера, его частоты, максимальной амплитуды и максимальной энергии от величины упругой деформации растяжения-сжатия. Исследовано влияние упругой де-

формации данного кристалла на его фононный спектр. Полученные результаты могут быть полезны при исследовании подобных объектов в экспериментах. Они вносят вклад в понимание роли дискретных бризеров в формировании физических свойств кристаллов [32-45].

Исследование выполнено в рамках научного проекта №166 программы Министерства образования и науки РФ «Формирование государственных заданий высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ» и при финансовой поддержке грантов РФФИ №16-42-220002 p_a , №15-48-04127 $p_{\text{сибирь}}_a$.

Список используемой литературы

1. Sievers A.J., Takeno S. Intrinsic localized modes in anharmonic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V.61. No.8. P. 970-973.
2. Flach S., Gorbach A.V. Discrete breathers: advances in theory and application // *Phys. Rep.* 2008. V.467. P. 1-116.
3. Chechen G.M., Dzhelauhova G.S., Mehonoshina E.A. Quasibreathers as a generalization of the concept of discrete breathers // *Phys. Rev. E.* 2006. V.74. P. 36608.
4. Sato M., Sievers A.J. Direct observation of the discrete character of intrinsic localized modes in an antiferromagnet // *Nature*. 2004. V. 432. P. 486.
5. Fleischer J.W., Carmon T., Segev M., Efremidis N.K., Christodoulides D.N. Observation of discrete solitons in optically induced real time waveguide arrays // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V.90. No.2. P. 023902.
6. Sato M., Hubbard B.E., Sievers A.J., Ilic B., Czaplewski D.A., Craighead H.G. Observation of locked intrinsic localized vibrational modes in a micromechanical oscillator array // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V.90. No.4. P. 044102.
7. Дмитриев С.В., Хадеева Л.З. Щелевые дискретные бризеры в двухкомпонентном двумерном кристалле в состоянии теплового равновесия // *Физика твердого тела*. 2011. т.53. №7. С. 1353-1358.
8. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Потеев А.И., Захаров П.В., Маркидонов А.В., Ерёмин А.М. Локализация энергии в упорядоченных конденсированных системах: сплавы состава A_3B со сверхструктурой $L1_2$ // *Известия*

- высших учебных заведений. Физика. 2014. т.57. №3. С. 92-100.
9. Захаров П.В., Старостенков М.Д., Ерёмин А.М., Маркидонов А.В. Поведение нелинейной локализованной моды вблизи комплексов вакансий в кристалле Pt_3Al // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. т.11. №2. С. 260-264.
10. Захаров П.В., Старостенков М.Д., Медведев Н.Н., Ерёмин А.М., Маркидонов А.В. Антисимметричный дискретный бризер в кристалле Pt_3Al // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. т.11. №3. С. 388-393.
11. Захаров П.В., Старостенко М.Д., Медведев Н.Н., Ерёмин А.М., Маркидонов А.В. Влияние низких температур на характеристики дискретного бризера в кристалле Pt_3Al // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. т.11. №4. С. 533-536.
12. Захаров П.В., Старостенков М.Д., Дмитриев С.В., Медведев Н.Н., Ерёмин А.М. Моделирование взаимодействия дискретных бризеров различного типа в нановолокне кристалла Pt_3Al // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. т.148. в.2(8). С. 252-257.
13. Zakharov P.V., Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Eremin A.M. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
14. Старостенков М.Д., Потекаев А.И., Дмитриев С.В., Захаров П.В., Ерёмин А.М., Кулагина В.В. Динамика дискретных бризеров в кристалле Pt_3Al // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. т.58. №9. С. 136-140.
15. Захаров П.В., Ерёмин А.М., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В. Компьютерное моделирование нелинейной локализованной колебательной моды большой амплитуды в кристалле Pt_3Al с бивакансией Pt // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. т.7. №5. С. 1089-1096.
16. Захаров П.В., Ерёмин А.М., Старостенков М.Д. Влияние межузельных атомов на квазibriзерные моды в кристалле стехиометрии A_3B с морзевским взаимодействием // Химическая физика и мезоскопия. 2016. т.18. №1. С. 114-121.
17. Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Mulyukov R.R., Pozhidaeva O.V., Potekaev A.I., Starostenkov M.D. Localized vibrational modes in an A_3B two-dimensional perfect crystal // Russian Physics Journal. 2008. V.51. No.8. P. 858-865.
18. Khadeeva L.Z., Dmitriev S.V. Lifetime of gap discrete breathers in diatomic crystals at thermal equilibrium // Phys. Rev. B. 2011. V.84. No.14. P. 144304.
19. Баимова Ю.А., Ямилова А.Б., Лобзенко И.П., Дмитриев С.В., Чечин Г.М. Двумерные кластеры дискретных бризеров в графене // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. т.11. №4/2. С. 599-604.
20. Khadeeva L.Z., Dmitriev S.V., Kivshar Y.S. Discrete breathers in deformed graphene // JETP Lett. 2011. V.94. No.7. P. 539-543.
21. Korznikova E.A., Savin A.V., Baimova Y.A., Dmitriev S.V., Mulyukov R.R. Discrete breather on the edge of the graphene sheet with the armchair orientation // JETP Letters. 2012. V.96. No.4. P. 222-226.
22. Korznikova E.A., Baimova J.A., Dmitriev S.V. Effect of strain on gap discrete breathers at the edge of armchair graphene nanoribbons // Europhys. Lett. 2013. V.102. No.6. P. 60004.
23. Baimova J.A., Dmitriev S.V., Zhou K. Discrete breather clusters in strained graphene // Europhys. Lett. 2012. V.100. P. 36005.
24. Liu B., Baimova J.A., Dmitriev S.V., Wang X., Zhu H., Zhou K. Discrete breathers in hydrogenated graphene // Journal of Physics D: Applied Physics. 2013. V.46. No.30. P. 305302.
25. Lobzenko I., Dmitriev S., Baimova J., Dzheleluhova G. Numerical studies of discrete quasi-breathers in graphene in the framework of density functional theory // Materials Science Forum. 2016. V.845. P. 215-218.
26. Baimova J., Lobzenko I., Dmitriev S. Clusters of discrete breathers in carbon and hydrocarbon nanostructures // Materials Science Forum. 2016. V.845. P. 255-258.
27. Baimova J.A., Korznikova E.A., Lobzenko I.P., Dmitriev S.V. Discrete breathers in carbon and hydrocarbon nanostructures // Reviews on Advanced Materials Science. 2015. V.42. No.1. P. 68-82.
28. Chechin G.M., Dmitriev S.V., Lobzenko I.P., Ryabov D.S. Properties of discrete breathers in graphene from ab initio simulations // Phys. Rev. B. 2014. V.90. P. 045432.
29. Dmitriev S.V., Baimova Y.A. Effect of elastic deformation on phonon spectrum and characteristics of gap discrete breathers in crystal with NaCl-type structure // Technical Physics Letters. 2011. V.37. No.5. P. 451-454.

30. Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля: монография / под общ. ред. А.И. Потекаева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 312 с.
31. Захаров П.В. Модуль расчета плотности фононных состояний модельных кристаллов методом молекулярной динамики // Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614597 от 21 апреля 2015.
32. Archilla J.F.R., Russell F.M. On the charge of quodons // Letters on materials. 2016. 6(1). P. 3-8.
33. Xiong D., Zhang J. Discrete breathers: possible effects on heat transport // Letters on materials. 2016. 6(1). P. 27-30.
34. Dmitriev S.V. Discrete breathers in crystals: achievements and open problems // Letters on materials. 2016. 6(1). P. 86-89.
35. Zakharov P.V., Dmitriev S.V., Starostenkov M.D. Dynamics of Discrete Breathers in the Pt₃Al Crystal // Key Engineering Materials. 2016. V.685. P. 65-69.
36. Mohammed Aish, Mikhail Starostenkov Mechanical properties of metallic nanowires using tight-binding model // AIP Conference Proceedings. 1698, 040006 (2016).
37. Poletaev G., Novoselova D., Kaygorodova V., Starostenkov M. The formation of excess free volume in triple junctions of <111> and <100> tilt boundaries in Ni at crystallization // AIP Conf. Proc. 1698, 040005 (2016).
38. Kotrechko S., Ovsjannikov A., Stetsenko N., Mikhailovskiy I., Mazilova T., Starostenkov M. Yield strength temperature dependence of tungsten nanosized crystals: experiment and simulation // Philosophical Magazine. 2016. V.96. Iss.5. P. 473-485.
39. Poletaev G.M., Starostenkov M.D., Novoselova D.V., Tsellermaer V.Y. The study of the thermal stability of Ni₃Al nanoneedles using computer simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V.116. P. 012026.
40. Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Динамические коллективные смещения атомов в металлах и их роль в вакансионном механизме диффузии // Физика твердого тела. 2009. т.51. №4. С. 686-691.
41. Харина Е.Г., Старостенков М.Д., Полетаев Г.М., Ракитин Р.Ю. Энергия активации самодиффузии по симметричным границам зерен наклона <111> в интерметаллиде Ni₃Al // Физика твердого тела. 2011. т.53. №5. С. 980-983.
42. Мартынов А.Н., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Атомный механизм диффузии по малоугловым границам кручения в ГЦК металлах // Письма о материалах. 2011. т.1. №1. С. 43-46.
43. Безносюк С.А., Потекаев А.И., Старостенков М.Д. Теоретические основы компьютерного нанотехнологического биомиметического наносистем // монография / М. С. Жуковский [и др.] ; Алтайский гос. ун-т [и др.]. Томск, 2011. 223 с.
44. Полетаев Г.М., Мартынов А.Н., Старостенков М.Д. Структура и энергия границ зерен кручения в ГЦК металлах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010. т.7. №4. С. 27-34.
45. Санников А.В., Полетаев Г.М., Сосков А.А., Старостенков М.Д. Взаимодействие точечных дефектов с когерентными межфазными границами Ni-Al (100) и (111) // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. т.11. №3. С. 317-321.
- ¹Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет, Бийск, Россия.
- ²Алтайский государственный технический университет, Барнаул, Россия.

Подписано в печать 24.05.16.

Сведения об авторах

Захаров Павел Васильевич, к.ф.-м.н., доцент АГАО, zakharovpv1@rambler.ru
Старостенков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой АлтГТУ, genphys@mail.ru
Ерёмин Александр Михайлович, к.ф.-м.н., доцент АГАО, eam77@yandex.ru