

УДК: 538.91

Нелинейная супратрансмиссия в кристалле стехиометрии A_3B при интенсивном внешнем воздействии

А. И. Чередниченко^{1,а}, П. В. Захаров¹, М. Д. Старостенков²,
М. О. Сысоева³, А. М. Ерёмин¹

¹Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,
Россия, 659333, Алтайский край, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, д. 53

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

³Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
Россия, 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27

E-mail: ^аanton.chered@mail.ru

Получено *дд.мм.гггг*, после доработки — *дд.мм.гггг*.

Принято к публикации *дд.мм.гггг*.

Методом молекулярной динамики изучен эффект нелинейной супратрансмиссии в кристалле стехиометрии A_3B , на примере Pt_3Al , заключающийся в передаче энергии на частотах вне фононного спектра кристалла. Исследование механизмов транспорта энергии от поверхности материала вглубь является важной задачей, как с теоретической точки зрения, так и перспектив практического применения при модификации приповерхностных слоев обработкой интенсивными внешними воздействиями различного характера. Модель представляла собой объемный гранецентрированный кубический кристалл, атомы которого взаимодействовали посредством многочастичного потенциала, полученного методом погруженного атома, что обеспечивает большую реалистичность модели по сравнению с применением парных потенциалов. Рассмотрены разные формы осцилляции области внешнего воздействия. Показана возможность транспорта энергии от поверхности кристалла вглубь посредством возбуждения квази-бризеров вблизи области воздействия и последующего их разрушения в кристалле и рассеяния запасенной на них энергии. Отметим, что под квази-бризерами понимаются высокоамплитудные нелинейные колебания атомов легкой компоненты сплава на частотах вне фононного спектра кристалла. При этом установлено, что не при любой форме осцилляции области воздействия наблюдался данный эффект. Наиболее интенсивно квази-бризеры возникали вблизи области воздействия при синусоидальной форме колебаний. Полученные результаты свидетельствуют, что вклад квази-бризеров в передачу энергии по кристаллу возрастает при увеличении амплитуды воздействия. Рассмотрен диапазон амплитуд от 0.05 до 0.5 Å. Частота воздействия варьировалась от 0.2 до 15 ТГц, что обеспечивало охват всего спектра малоамплитудных колебаний для данной модели кристалла. Установлена минимальная величина амплитуды внешнего воздействия, при которой наблюдался данный эффект, которая составила 0.2 Å. При амплитудах более 0.5 Å происходит быстрое разрушение ячейки для частот близких к оптической ветви фононного спектра. Результаты проведенного исследования могут быть полезны при лазерной обработке материалов и обработке поверхности низкоэнергетической плазмой, а также в радиационном материаловедении.

Ключевые слова: нелинейная супратрансмиссия, дискретный бризер, солитон, квази-бризер, нелинейная динамика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Алтайского края в рамках научного проекта № 18-42-220002

© 2018 Антон Иванович Чередниченко, Павел Васильевич Захаров, Михаил Дмитриевич Старостенков, Маргарита Олеговна Сысоева, Александр Михайлович Ерёмин

UDC: 538.91

Nonlinear supratransmission in a crystal of A_3B stoichiometry under intense external influence

A. I. Cherednichenko^{1,a}, P. V. Zakharov¹, M. D. Starostenkov²,
M. O. Sysoeva³, A. M. Eremin¹

¹The Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Korolenko Str., Biysk, 659333, Russia

²I. I. Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Pr., Barnaul, 656038, Russia

³Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University,
27, Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova Str., Biysk, 659305, Russia

E-mail: ^a anton.chered@mail.ru

Received 00.00.2022, after completion — 00.00.2022.

Accepted for publication 00.00.2022.

The effect of the nonlinear supratransmission in crystal of A_3B stoichiometry is studied by molecular dynamics on the example of Pt_3Al alloy. This effect is the transfer of energy at frequencies outside the phonon spectrum of the crystal. Research of the mechanisms of energy transport from the material surface to the interior is the important task, both from the theoretical point of view and from the prospects for practical application in the modification of near-surface layers by treatment with intense external influence of various types. The model was a three-dimensional face-centered cubic crystal whose atoms interact by means of the multiparticle potential obtained by the embedded atom method, which provides greater realism of the model in comparison with the use of pair potentials. Various forms of oscillation of the external influence region are considered. The possibility of energy transport from the crystal surface to the interior is shown by excitation of quasi-breathers near the region of influence and their subsequent destruction in the crystal and scattering of the energy stored on them. The quasi-breathers are high-amplitude nonlinear atoms' oscillations of the alloy lightweight component at frequencies outside the phonon spectrum of the crystal. This effect was observed not with every oscillation's form of the region of influence. Quasi-breathers appeared most intensely near the region of influence with sinusoidal form oscillations. The results obtained indicate that the contribution of quasi-breathers to the energy transfer through the crystal increases with increasing amplitude of the influence. The range of amplitudes from 0.05 to 0.5 Å is considered. The frequency of the influence varied from 0.2 to 15 THz, which ensured the coverage of the entire spectrum of low-amplitude oscillations for this crystal's model. The minimum magnitude of the external effect amplitude at which this effect was observed was found to be 0.15 Å. At amplitudes greater than 0.5 Å, the cell rapidly decays for frequencies close to the optical branch of the phonon spectrum. The results of the study can be useful for laser processing of materials, surface treatment by low-energy plasma, and also in radiation materials science.

Keywords: nonlinear supratransmission, discrete breather, soliton, quasi-breather, nonlinear dynamics.

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. ?, pp. ???–??? (Russian).

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research and the government of the Altai region, grant №18-42-220002

© 2018 Anton I. Cherednichenko, Pavel V. Zakharov, Mikhail D. Starostenkov, Margarita O. Sysoeva, Alexander M. Eremin

1. Введение

Способы модификации приповерхностных слоев материалов очень часто базируются на обработке поверхности высокоинтенсивными внешними воздействиями в виде плазменного разряда, отжига, импульсов тока и т.д. Потоки энергии от поверхности кристаллов оказывают влияние на структурные и энергетические трансформации материалов, обеспечивая таким образом модификацию приповерхностных слоев вещества.

В данной работе нами рассмотрен эффект передачи энергии при периодическом воздействии на поверхность кристалла стехиометрического состава A_3B , имеющего запрещенную зону в фоновом спектре кристалла. Воздействие осуществлялось в широком диапазоне частот как, входящих в фоновый спектр, так и вне фонового спектра кристалла. Эффект передачи энергии на частотах вне фонового спектра кристалла называют нелинейной супратрансмиссией [Geniet, Leon, 2002]. Интерес к данному эффекту не угасает как для относительно простых нелинейных систем [Khomeiriki, Lepri, Ruffo, 2004], так и для более сложных систем и материалов [Evazzade, Lobzenko, Korznikova, Ovid'ko, 2017; Yousefzadeh, Phani, 2016; Leon, 2003; Ponson, Boechler, Lai, Porter, Kevrekidis, Daraio, 2010]. В классическом подходе к супратрансмиссии имеется начальная величина амплитуды, при которой возникает данный эффект. Однако в работе [Evazzade, Lobzenko, Korznikova, Ovid'ko, 2017], на примере деформированного графена, показана возможность транспорта энергии посредством нелинейной супратрансмиссии без ограничений по минимальному значению амплитуды воздействия. Это мотивирует исследование данного эффекта для различных кристаллов и поиска механизмов передачи энергии в нелинейных системах.

Данный механизм трактуется возбуждением нелинейных локализованных мод большой амплитуды вблизи зоны воздействия – дискретных бризеров. Строго говоря, такие объекты следует называть квази-бризерами [Chechin, Dzhelauhova, Mehonoshina, 2006; Захаров, Старостенков, Ерёмин, Маркидонов, 2014; Захаров, Старостенков, Ерёмин, Корзникова, Дмитриев, 2017; Захаров, Дмитриев, Старостенков, Ерёмин, Корзникова, 2017; Старостенков, Захаров, Медведев, 2011; Маркидонов, Старостенков, Павловская, Яшин, Медведев, Захаров, Ситников, 2013], в силу того, что они имеют конечное время жизни и не строгую периодичность по времени.

В работе рассматривается модель кристалла Pt_3Al . Интерес к данному сплаву вызван перспективой его применения в составе суперсплавов, а также его устойчивостью к высоким температурам. Кроме того, в работе [Захаров, Старостенков, Ерёмин, Корзникова, Дмитриев, 2017] показана возможность возбуждения дискретных бризеров в данном материале потоком частиц и при термодинамическом равновесии [Старостенков, Потекаев, Дмитриев и др., 2015].

2. Модель и методика эксперимента

Рассматриваемая нами модель представляет собой объемный ГЦК кристалл стехиометрии A_3B , на примере Pt_3Al , который содержит $32 \cdot 10^3$ частиц (рис. 1), взаимодействующих посредством потенциала, полученного методом погруженного атома (EAM-потенциал) [Zhou, Johnson, Wadley, 2004]. В вычислительной химии модель погружённого атома используется для приближенного описания энергии взаимодействия между двумя атомами. Выбор потенциала и обоснованность его использования для конкретной задачи является важным этапом при моделировании. Полная энергия E кристалла может быть выражена как:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i,j,i \neq j} \varphi_{ij}(r_{ij}) + \sum_i F_i(\rho_i), \quad (1)$$

где φ_{ij} представляет парную энергию между атомами i и j , отделенными друг от друга расстоянием r_{ij} , а F_i – энергия вложения, связанная с вложенным атомом i в локальном местоположении с электронной плотностью ρ_i . Электронную плотность можно рассчитать по формуле:

$$\rho_i = \sum_{j,j \neq i} f_j(r_{ij}), \quad (2)$$

где $f_j(r_{ij})$ – электронная плотность на участке атома i , находящегося на расстоянии r_{ij} от атома j .

Моделирование осуществлялось посредством пакета LAMMPS [URL: <http://lammps.sandia.gov/>]. Пакет молекулярного программирования LAMMPS (LargescaleAtomic/MolecularMassivelyParallelSimulator) является эффективным средством для построения моделей различных процессов. LAMMPS имеет открытый код и распространяется по лицензии GNU Public License (GPL). При помощи пакета LAMMPS можно создавать все основные типы кристаллических решеток: ОЦК, ГЦК, ГП и др. В пакете LAMMPS содержится большое количество EAM потенциалов различных металлов (золото, железо, никель, платина, медь и т.д.). LAMMPS может выводить следующие данные: термодинамические параметры системы, координаты, скорости и другую информацию о каждом отдельном атоме, усредненную по времени информацию об атомах или свойствах системы.

На модель ГЦК кристалла вдоль осей X, Y накладывались периодические граничные условия, вдоль оси Z – свободные. Полученная модель была разделена на 3 блока. Блок I представлял собой 3-4 слоя атомов, которые осуществляли колебания по гармоническому закону в соответствии с диапазонами частот и амплитуд колебаний атомов. Далее находился блок II – поглотитель энергии, по которому происходило оценивание поглощенной энергии кристаллом. В части III расчетной ячейки выделялся блок из 4-5 слоев атомов, жестко зафиксированных, выполняющих роль демпфера. Это обеспечивало отсутствие движения всей модели кристалла Pt₃Al. На рис. 1,б приведена плотность фононных состояний рассматриваемой модели кристалла.

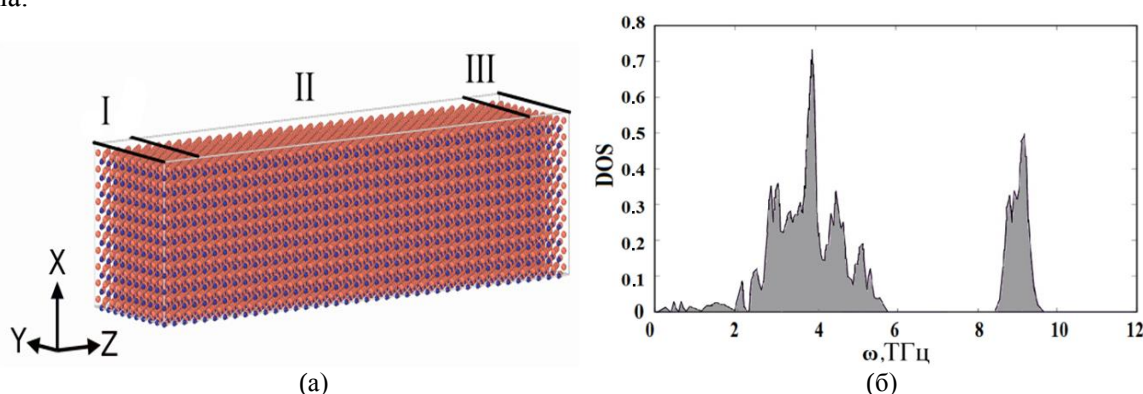


Рис. 1. а) Вид трехмерной модели кристалла Pt₃Al, ось X направлена вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$, Y – $\langle 010 \rangle$, Z – $\langle 001 \rangle$. Цифрой I указана область периодического воздействия, II – область поглощения энергии, III – жестко зафиксированные атомы; б) плотность фононных состояний кристалла Pt₃Al

Периодическое воздействие осуществлялось по следующим законам:

$$Z_1(t) = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$Z_2(t) = A (\sin(\omega t))^2 \quad (4)$$

$$Z_3(t) = A |\sin(\omega t)| \quad (5)$$

где для всех случаев A – амплитуда внешнего воздействия, ω – частота колебаний области I на рис. 1,а. Данные гармонические законы вводились через команды встроенных в LAMMPS математических функций и переменные. Колебания производились по оси Z с частотами от 0.2 до 15 ТГц, и с различными амплитудами от 0.05 до 0.5 Å. Такой диапазон позволяет охватить весь спектр малоамплитудных колебаний атомов для рассматриваемого кристалла.

3. Результаты и обсуждения

Фиксировалась поглощенная энергия в зависимости от частоты воздействия и амплитуды. Полученные результаты для воздействия по закону (3) представлены на рис. 2. Исходя из данного графика можно отметить, что для амплитуд менее $0.2 \text{ \AA}$ эффект передачи энергии кристаллу отсутствовал в запрещенной зоне фононного спектра (рис. 1,б). Для амплитуд 0.2 ангстрем и более происходит передача энергии кристаллу, в том числе на частотах в запрещенной зоне фононного спектра. С увеличением амплитуды пик поглощения смещается глубже в запрещенные частоты фононного спектра кристалла, что свидетельствует об увеличении доли нелинейных мод в процессе передачи энергии. Активное возбуждение бризеров происходит в непосредственной близости с областью воздействия, аналогичные результаты нами были получены ранее для двумерных моделей данного сплава [Медведев, Старостенков, Захаров, Пожидаева, 2011] и в работе [Захаров, Старостенков, Ерёмин, Луценко, 2018]. Отметим, что имеется пороговое значение амплитуды воздействия, с которого начинает проявляться данный эффект, что характерно при классической трактовке эффекта супратрансмиссии. Также характерным является пик на частотах воздействия 6 ТГц . Природу всплеска поглощения на данной частоте обсудим ниже с учетом анализа результатов воздействия по уравнениям (4) и (5).

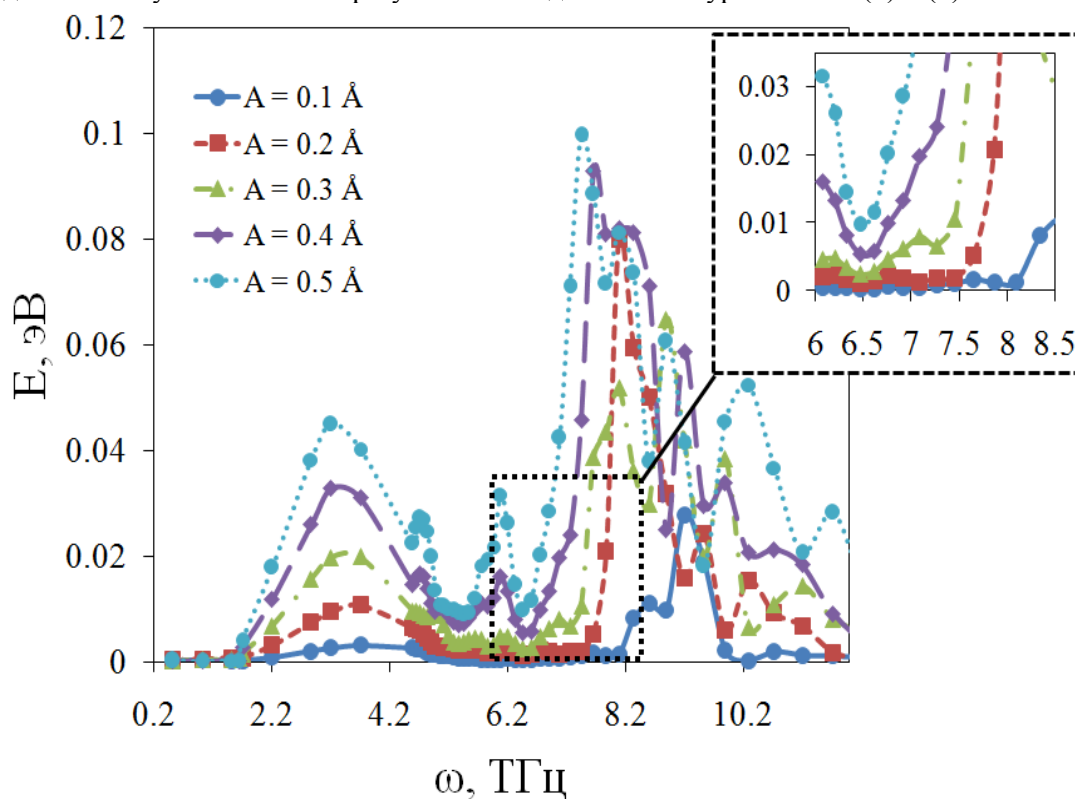


Рис. 2. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (3), увеличен масштаб для частот от 6 до 9 ТГц

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты воздействий по гармоническим законам (4) и (5). По графикам видно, что количество переданной кристаллу энергии несколько меньше, чем при воздействии по формуле (3). Причиной расхождений в результатах может являться то, что возбуждение квази-бризеров вблизи области воздействия происходит медленнее в данных случаях, т.к. форма воздействия сильнее отличается от параметров возбуждения квази-бризеров.

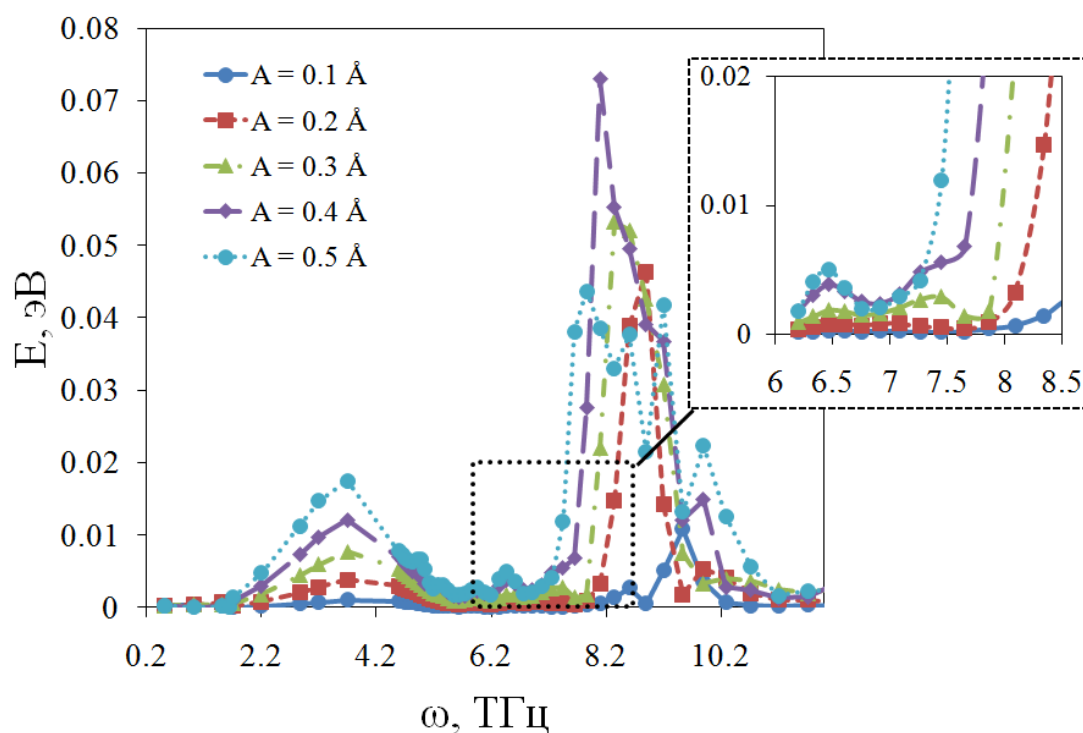


Рис. 3. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (4), увеличен масштаб для частот от 6 до 9 ТГц

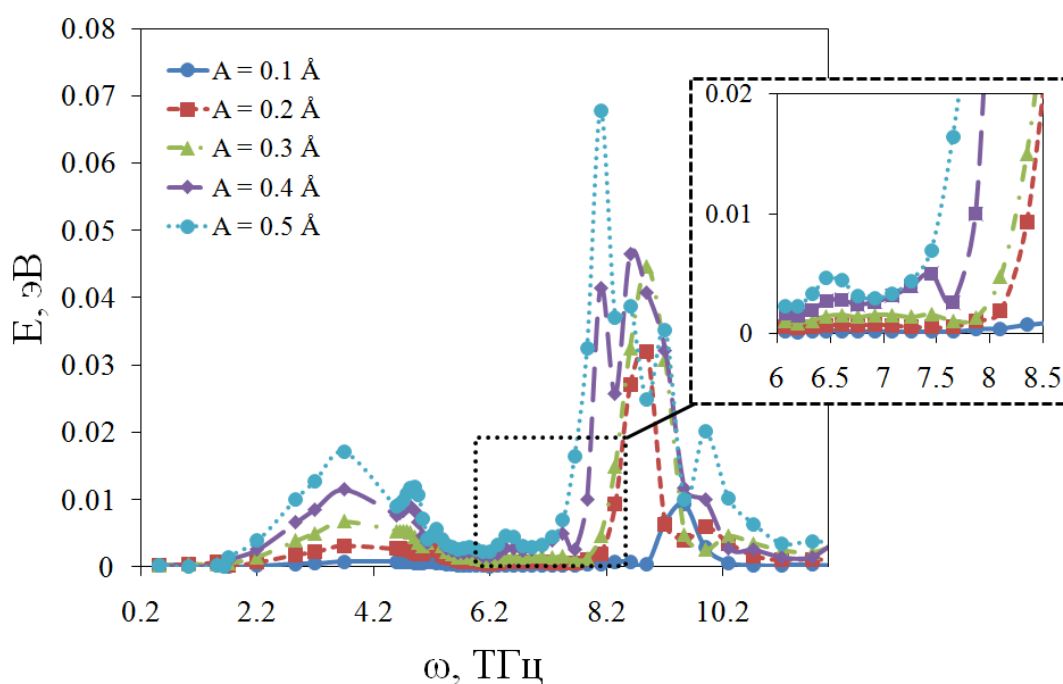


Рис. 4. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (5), увеличен масштаб для частот от 6 до 9 ТГц

Так как получены результаты для уравнений (3) – (5) имеют некоторые отличия, то далее проанализировано поведение первого слоя атомов вблизи области воздействия. Для этого выбиралось по одному атому Pt и Al в этом слое и отслеживалась их динамика с течением време-

ни для всего диапазона частот. Для примера на рис. 5 приведено изменение координаты Z атомов относительно положения равновесия для частоты 6 ТГц и амплитуды 0.4 (рис. 5, а, б), для частоты 8 ТГц и амплитуды 0.2 Å (рис. 5, в, г).

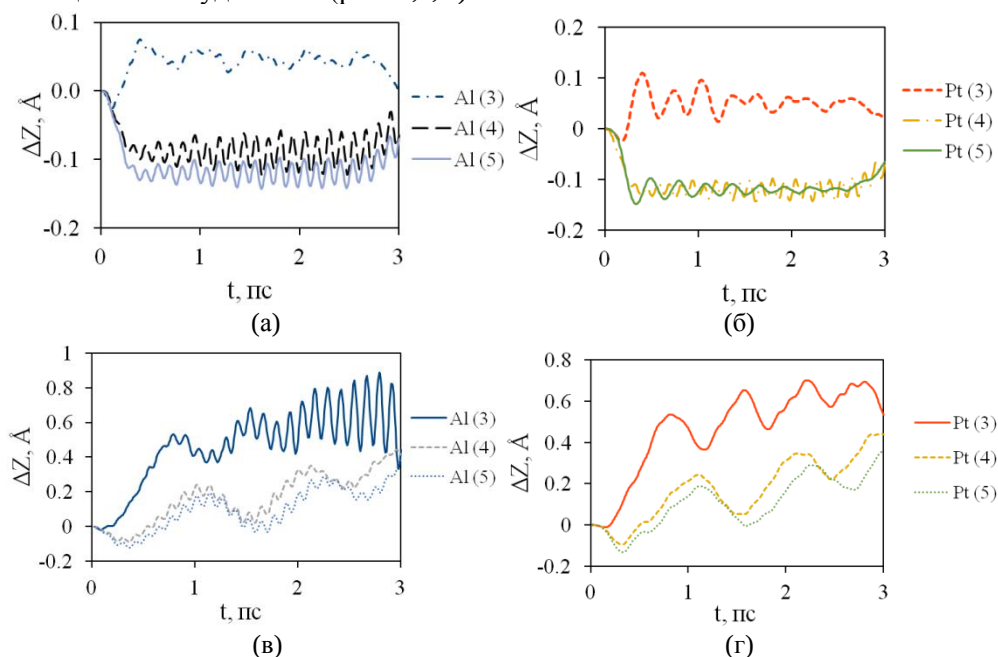


Рис.5. Изменение координаты Z атомов Pt и Al относительно положения равновесия на границе области воздействия, при воздействии по гармоническим законам (3), (4) и (5); а) и б) частота воздействия 6 ТГц, амплитуда 0.4 для соответствующего воздействия, в) и г) частота воздействия 8 ТГц, амплитуда 0.2 для соответствующего воздействия

Для частот близких к оптической ветви ФС по гармоническому закону (3) более активно возбуждаются колебания на атоме Al, что свидетельствует о возбуждении дискретных бризеров, в то время как для выражений (4) и (5), такой активности не наблюдается. При этом происходит локальное расширение вблизи области воздействия, что свидетельствует о возбуждении дискретных бризеров. Рассматривая пик поглощения энергии при частоте 6 ТГц, отметим, что он обусловлен активным вовлечением атомов тяжелой подрешетки в колебания, т.к. частота воздействия близка к верхней границы акустической части ФС кристалла. Так из рис. 5, б следует, что атомы Pt при воздействии по формуле (3) совершают высокоамплитудные колебания, однако, как уже указывалось выше, такие большие значения амплитуд внешнего воздействия приводят к быстрому разрушению приповерхностного слоя модельного кристалла, что и произошло через 1.5 пс воздействия. Аналогичные результаты получены для всего спектра частот и амплитуд внешнего периодического воздействия по уравнениям (3) – (5).

4. Заключение

Методом молекулярной динамики для кристалла Pt_3Al рассмотрен механизм нелинейной супратрансмиссии для различных форм внешнего воздействия. Было показано, что транспорт энергии посредством данного механизма возможен вдоль направлений соответствующих кристаллографическим направлениям существования квази-бризера в кристалле. Полученные результаты свидетельствуют, что вклад квази-бризеров в передачу энергии по кристаллу возрастает при увеличении амплитуды воздействия. Результаты проведенного исследования могут быть полезны при лазерной обработке материалов и обработке поверхности низкоэнергетической плазмой, а также в радиационном материаловедении.

Список литературы (References)

- Захаров П. В., Дмитриев С. В., Старостенков М. Д., Ерёмин А. М., Корзникова Е. А. Стационарные квазибризеры в моноатомных металлах с ГЦК-структурой // ЖЭТФ. – 2017. – Т. 152, Вып. 5, № 11. – С. 1073-1080.
Zakharov P. V., Dmitriev S. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Korznikova E. A. Stationary Quasi-Breathers in Monatomic FCC Metals // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2017. – Vol. 125, Issue 5. – P. 913-919. (Original Russian paper: Zakharov P. V., Dmitriev S. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Korznikova E. A. Statsionarnyye kvazibrizery v monoatomnykh metallakh s GTSK-strukturoy // ZhETF. – 2017. – Vol. 152, Issue 5, No. 11. – P. 1073-1080).
- Захаров П. В., Старостенков М. Д., Ерёмин А. М., Корзникова Е. А., Дмитриев С. В. Возбуждение щелевых дискретных бризеров в кристалле состава A_3B потоком частиц // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59, № 2. – С. 217-222.
Zakharov P. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Korznikova E. A., Dmitriev S. V. Excitation of gap discrete breathers in an A_3B crystal with a flux of particles // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, No. 2. – P. 223-228. (Original Russian paper: Zakharov P. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Korznikova E. A., Dmitriev S. V. Vozbuzhdenie schelevykh diskretnykh brizerov v kristalle sostava A_3B potokom chastits // Fizika tverdogo tela. – 2017. – Vol. 59, No. 2. – P. 217-222).
- Захаров П. В., Старостенков М. Д., Ерёмин А. М., Луценко И. С. Эффект нелинейной супратрансмиссии в кристалле Pt_3Al // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 289-293.
Zakharov P. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Lucenko I. S. Effekt nelineynoy supratransmissii v kristalle Pt_3Al [The effect of the nonlinear supratransmission in Pt_3Al crystal] // Basic Problems of Material Science. – 2018. – Vol. 15, No. 2. – P. 289-293 (in Russian).
- 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.
Zakharov P. V., Starostenkov M. D., Eremin A. M., Markidonov A. V. Povedenie nelineynoy lokalizovannoy mody vblizi kompleksov vakansiy v kristalle Pt_3Al [Behavior of the nonlinear localized fashion near complexes of vacancies in Pt_3Al crystal] // Basic Problems of Material Science. – 2014. – Vol. 11, No. 2. – P. 260-264 (in Russian).
- Маркидонов А. В., Старостенков М. Д., Павловская Е. П., Яшин А. В., Медведев Н. Н., Захаров П. В., Ситников А. А. Расщепление вакансионной поры в зернограничной области ударной послекаскадной волной // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 443-450.
Markidonov A. V., Starostenkov M. D., Pavlovskaya E. P., Yashin A. V., Medvedev N. N., Zakharov P. V., Sitnikov A. A. Rassheplenie vakansionnoy poryi v zernogranichnoy oblasti udarnoy poslekaskadnoy volnoy [Splitting of a vakansionny time in zernogranichny area a shock postcascade wave] // Basic Problems of Material Science. – 2013. – Vol. 10, No. 3. – P. 443-450 (in Russian).
- Медведев Н. Н., Старостенков М. Д., Захаров П. В., Пожидаева О. В. Локализованные колебательные моды в двумерной модели упорядоченного сплава Pt_3Al // Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, № 3. – С. 7-15.
Medvedev N. N., Starostenkov M. D., Zakharov P. V., Pozhidaeva O. V. Localized oscillating modes in two-dimensional model of regulated Pt_3Al alloy // Technical Physics Letters. – 2011. – Vol. 37, Issue 2. – P. 98-101. (Original Russian paper: Medvedev N. N., Starostenkov M. D., Zakharov P. V., Pozhidaeva O. V. Lokalizovannyye kolebatelnyye mody v dvumernoy modeli uporyadochennogo splava Pt_3Al // Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2011. – Vol. 37, No. 3. – P. 7-15).
- Старостенков М. Д., Захаров П. В., Медведев Н. Н. Изучение посредством двумерной модели возможности существования нелинейных локализованных колебаний на границе биметалла $Pt-Al$ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 40-44.
Starostenkov M. D., Zakharov P. V., Medvedev N. N. Izuchenie posredstvom dvumernoy modeli vozmozhnosti suschestvovaniya nelineynykh lokalizovannykh kolebaniy na granitse bimetallda $Pt-Al$ [Studying by means of two-dimensional model of a possibility of existence of the nonlinear localized fluctuations on $Pt-Al$ bimetal border] // Basic Problems of Material Science. – 2011. – Vol. 8, No. 4. – P. 40-44 (in Russian).
- Старостенков М. Д., Поткаев А. И., Дмитриев С. В. и др. Динамика дискретных бризеров в кристалле Pt_3Al // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 136-140.
Starostenkov M. D., Potekaev A. I., Dmitriev S. V., etc. Dynamics of discrete breathers in a Pt_3Al crystal // Russian physics journal. – 2016. – Vol. 58, No. 9. – P. 1353-1357. (Original Russian paper: Starostenkov M. D., Potekaev A. I., Dmitriev S. V. i dr. Dinamika diskretnykh brizerov v kristalle Pt_3Al // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Fizika. – 2015. – Vol. 58, No. 9. – P. 136-140).

- Chechin G. M., Dzhelauhova G. S., Mehonoshina E. A.* Quasibreathers as a generalization of the concept of discrete breathers // *Physical Review E*. – 2006. – Vol. 74. – P. 036608.
- Evazzade I., Lobzenko I. P., Korznikova E. A., Ovid'ko I. A. et al.* Energy transfer in strained graphene assisted by discrete breathers excited by external ac driving // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 95, No. 3. – P. 035423.
- Geniet F., Leon J.* Energy Transmission in the Forbidden Band Gap of a Nonlinear Chain // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 89. – P. 134102.
- Khomeriki R., Lepri S., Ruffo S.* Nonlinear supratransmission and bistability in the Fermi-Pasta-Ulam model // *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys.* – 2004. – Vol. 70. – P. 066626.
- LAMMPS Molecular Dynamics Simulator [Electronic resource]: <http://lammps.sandia.gov/>.
- Leon J.* Nonlinear supratransmission as a fundamental instability // *Physics Letters A*. – 2003. – Vol. 319. – P. 130-136.
- Ponson L., Boechler N., Lai Y. M., Porter M. A., Kevrekidis P., Daraio C.* Nonlinear waves in disordered diatomic granular chains // *Physical Review E*. – 2010. – Vol. 82, No. 2. – P. 021301.
- Yousefzadeh B. and Phani A. S.* Supratransmission in a disordered nonlinear periodic structure // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 380. – P. 242-266.
- Zhou X. W., Johnson R. A. and Wadley H. N. G.* Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers // *Physical Review B*. – 2004. – Vol. 69. – P. 144113.