

УДК: 538.91

## Нелинейная супратрансмиссия в кристалле $Pt_3Al$ при интенсивном внешнем воздействии

А. И. Чередниченко<sup>1,a</sup>, П. В. Захаров<sup>1</sup>, М. Д. Старостенков<sup>2</sup>,  
М. О. Сысоева<sup>3</sup>, А. М. Ерёмин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46

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

E-mail: <sup>a</sup>anton.chered@mail.ru

Получено 27.08.2018, после доработки — 27.11.2018.

Принято к публикации 11.12.2018.

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 с точки зрения 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 квазибризеров вблизи области воздействия и последующего их разрушения в кристалле и рассеяния запасенной на них энергии. Отметим, что под квазибризерами понимаются высокоамплитудные нелинейные колебания атомов легкого компонента сплава на частотах вне фононного спектра кристалла. При этом установлено, что не при любой форме осцилляции области воздействия наблюдался данный эффект. Наиболее интенсивно квазибризеры возникали вблизи области воздействия при синусоидальной форме колебаний. Полученные результаты свидетельствуют, что вклад квазибризеров 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, квазибризер, нелинейная динамика

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

© 2019 Антон Иванович Чередниченко, Павел Васильевич Захаров, Михаил Дмитриевич Старостенков,  
Маргарита Олеговна Сысоева, Александр Михайлович Ерёмин

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.  
Чтобы получить текст лицензии, посетите вебсайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>  
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 538.91

## Nonlinear supratransmission in a Pt<sub>3</sub>Al crystal at intense external influence

A. I. Cherednichenko<sup>1,a</sup>, P. V. Zakharov<sup>1</sup>, M. D. Starostenkov<sup>2</sup>,  
M. O. Sysoeva<sup>3</sup>, A. M. Eremin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,  
53 Korolenko st., Biysk, 659333, Russia

<sup>2</sup> I. I. Polzunov Altai State Technical University,  
46 Lenin ave., Barnaul, 656038, Russia

<sup>3</sup> Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University,  
27 Geroya Sovetskogo Soyuza Trofimova st., Biysk, 659305, Russia

E-mail: <sup>a</sup> anton.chered@mail.ru

Received 27.08.2018, after completion — 27.11.2018.

Accepted for publication 11.12.2018.

The effect of the nonlinear supratransmission in crystal of A<sub>3</sub>B stoichiometry is studied by molecular dynamics on the example of Pt<sub>3</sub>Al 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*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 109–117 (Russian).

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

© 2019 Anton I. Cherednichenko, Pavel V. Zakharov, Mikhail D. Starostenkov,  
Margarita O. Sysoeva, Alexander M. Eremin

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>  
or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

## 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<sub>3</sub>B со сверхструктурой L1<sub>2</sub>, имеющего запрещенную зону в фоновом спектре кристалла, на примере Pt<sub>3</sub>Al. 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 [Khomeriki et al., 2004], так и для более сложных систем и материалов [Evazzade et al., 2017; Yousefzadeh, Phani, 2016; Leon, 2003; Ponson et al., 2010]. В классическом подходе к супратрансмиссии имеется начальная величина амплитуды, при которой возникает данный эффект. Однако в работе [Evazzade et al., 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 квазибризерами [Chechin et al., 2006; Захаров и др., 2014; Захаров и др., 2017b; Захаров и др., 2017a; Старостенков и др., 2011; Маркидонов и др., 2013] в силу того, что они имеют конечное время жизни и не строгую периодичность по времени.

В работе рассматривается модель кристалла Pt<sub>3</sub>Al. Интерес к данному сплаву вызван перспективой его применения в составе суперсплавов, а также его устойчивостью к высоким температурам. Кроме того, в работе [Захаров и др., 2017b] показана возможность возбуждения дискретных бризеров в данном материале потоком частиц и при термодинамическом равновесии [Старостенков и др., 2015].

## 2. Модель и методика эксперимента

Рассматриваемая нами модель представляет собой объемный ГЦК-кристалл стехиометрии A<sub>3</sub>B, на примере Pt<sub>3</sub>Al, который содержит  $32 \cdot 10^3$  частиц (рис. 1), взаимодействующих посредством потенциала, полученного методом погруженного атома (EAM-потенциал) [Zhou et al., 2004]. В вычислительной химии модель погруженного атома используется для приближенного описания энергии взаимодействия между двумя атомами. Выбор потенциала и обоснованность его использования для конкретной задачи являются 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  $\varphi_{ij}$  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  $\rho_i$ . 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).

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. Периодическое воздействие применялось ко всем атомам из блока I. 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  $Pt_3Al$  и делало модель более близкой к реальному кристаллу.

При проведении расчетов шаг интегрирования составлял 1 фс, при этом расчетное время каждого запуска составляло 1 пс, начальная температура расчетной ячейки задавалась 0 К. Для всех случаев рассматривался NVE-ансамбль.

На рис. 1, б приведена плотность фоновых состояний рассматриваемой модели кристалла.

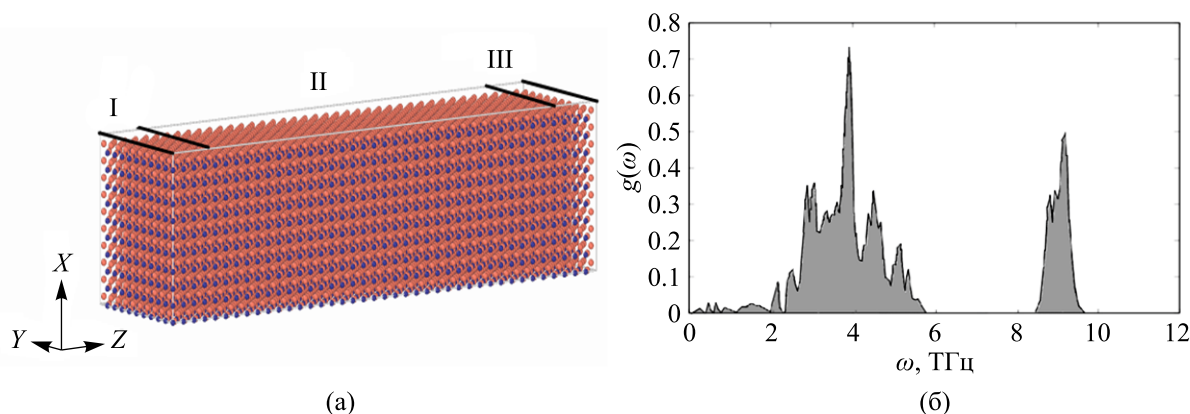


Рис. 1. а) Вид трехмерной модели кристалла  $Pt_3Al$ , ось  $X$  направлена вдоль кристаллографического направления  $\langle 100 \rangle$ ,  $Y$  —  $\langle 010 \rangle$ ,  $Z$  —  $\langle 001 \rangle$ ; цифрой I указана область периодического воздействия, II — область поглощения энергии, III — жестко зафиксированные атомы; б) плотность фоновых состояний кристалла  $Pt_3Al$

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,  $\omega$  — 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, что обеспечивалось за счет запуска скрипта 52 раза для каждого значения амплитуды. Такой диапазон позволяет охватить весь спектр малоамплитудных колебаний атомов для рассматриваемого кристалла. Производилось не менее трех повторных компьютерных экспериментов с одинаковыми начальными параметрами для сравнения полученных результатов.

Поглощенная энергия для атомов зоны II рассчитывалась посредством вычисления кинетической энергии атомов этого блока, затем полученное значение делилось на количество атомов в данном блоке, далее полученные результаты усреднялись. Такие расчеты проводились для каждого значения частоты.

### 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 и др., 2011] и в работе [Захаров и др., 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  $6 \text{ ТГц}$ . Природу всплеска поглощения на данной частоте обсудим ниже с учетом анализа результатов воздействия по уравнениям (4) и (5).

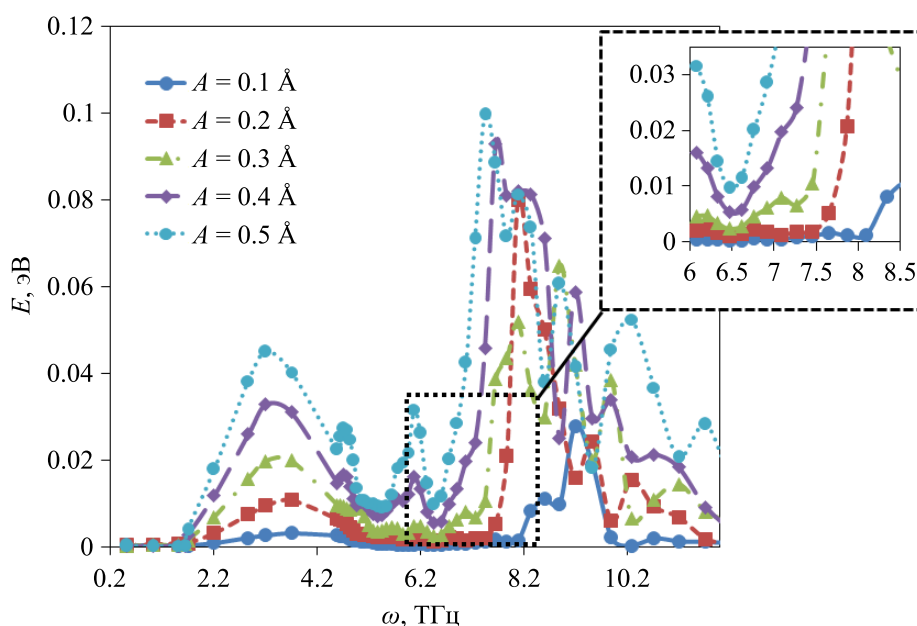


Рис. 2. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (3), увеличен масштаб для частот от  $6$  до  $9 \text{ ТГц}$

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 квазibriзеров вблизи области воздействия происходит медленнее в данных случаях, так как форма воздействия сильнее отличается от параметров возбуждения квазibriзеров.

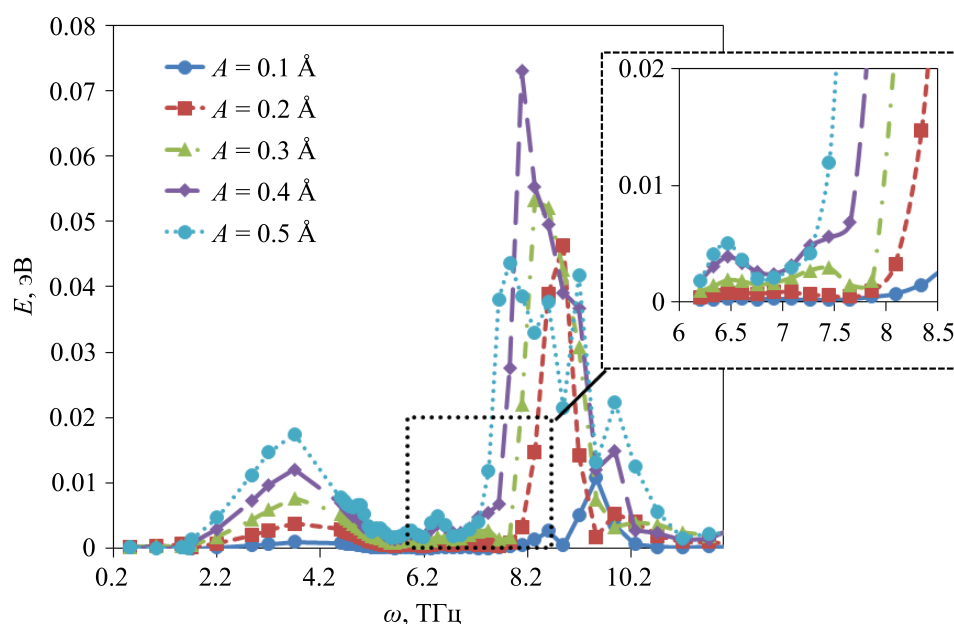


Рис. 3. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (4), увеличен масштаб для частот от 6 до 9 ТГц

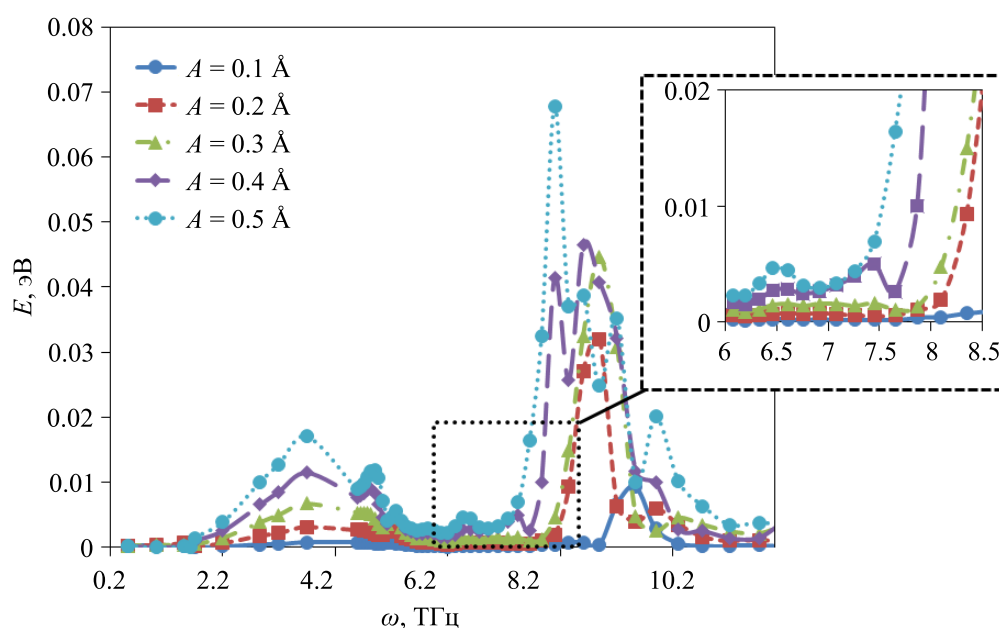


Рис. 4. Зависимость поглощенной энергии расчетной ячейкой на один атом за одну пикосекунду от частоты внешнего воздействия и амплитуды по закону (5), увеличен масштаб для частот от 6 до 9 ТГц

Так как полученные результаты для уравнений (3)–(5) имеют некоторые отличия, то далее проанализировано поведение первого слоя атомов вблизи области воздействия. Для этого выбиралось по одному произвольному атому Pt и Al в этом слое и отслеживалась их динамика с течением времени для всего диапазона частот. Для примера на рис. 5 приведено характерное 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).



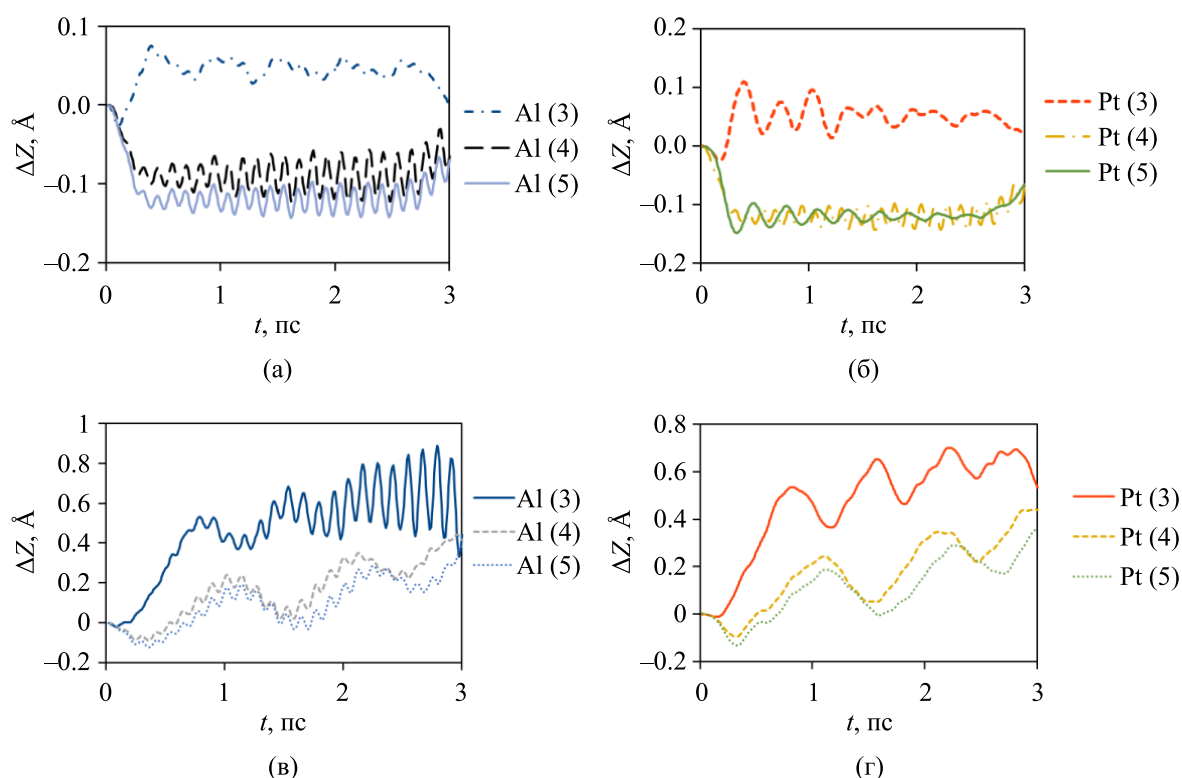


Рис. 5. Изменение координаты  $Z$  атомов Pt и Al относительно положения равновесия на границе области воздействия, при воздействии по гармоническим законам (3), (4) и (5); а) и б) частота воздействия 6 ТГц, амплитуда 0.4 для соответствующего воздействия; в) и г) частота воздействия 8 ТГц, амплитуда 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, так как частота воздействия близка к верхней границе 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  $\text{Pt}_3\text{Al}$  рассмотрен механизм нелинейной супратрансмиссии для различных форм внешнего воздействия. Было показано, что транспорт энергии посредством данного механизма возможен вдоль направлений, соответствующих кристаллографическим направлениям существования квазибризера в кристалле. Полученные результаты свидетельствуют, что вклад квазибризеров 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(a). — 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. Stacionarnyye kvazibrizeryi 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(b). — 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 v blizhi 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., Pavlovskay E. P., Yashin A. V., Medvedev N. N., Zakharov P. V., Sitnikov A. A. Rasscheplenie vakansionnoy poryi v zernogranichnoy oblasti udarnoy poslekaskadnoy volnoy [Splitting of a vacancy 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 tehnikeskoy 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 bimetalla  $Pt-Al$  [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., Потехаев А. И., Дмитриев С. В. и др. Динамика дискретных бризеров в кристалле Pt<sub>3</sub>Al // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 136–140.
- Starostenkov M. D., Potekhaev A. I., Dmitriev S. V. et al. Dynamics of discrete breathers in a Pt<sub>3</sub>Al crystal // Russian physics journal. — 2016. — Vol. 58, No. 9. — P. 1353–1357. (Original Russian paper: Starostenkov M. D., Potekhaev A. I., Dmitriev S. V. i dr. Dinamika diskretnykh brizerov v kristalle Pt<sub>3</sub>Al // Izvestiya vysshikh 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., 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., Wadley H. N. G. Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers // Physical Review B. — 2004. — Vol. 69. — P. 144113.

