

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.913; 539.8

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.004

СВЕРХЗВУКОВЫЕ КРАУДИН-ФОКУСОННЫЕ ТАНДЕМЫ В 3D КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛА Cu

Николай Николаевич Медведев^{1†}, Михаил Дмитриевич Старостенков²,
Сергей Владимирович Дмитриев³

^{1,4} Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. Ползунова», ул. Трофимова, 27, 65933, Бийск, Россия

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

³ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ Российской академии наук, пр. Октября, 71, 450054, Уфа, Россия

¹ nnm42@rambler.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>

² genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

³ dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Аннотация. В данной работе посредством метода молекулярной динамики с использованием модифицированного потенциала Морзе рассматривается проблема возбуждения *n*-краудионов в 3D моделях ГЦК кристаллов. Необходимость модификации потенциала Морзе обусловлена тем, что при моделировании взаимодействия атомов с высокими скоростями он занижает их диаметры. Использовалась модель кристалла меди. Изучались результаты одновременного запуска нескольких соседних атомов, находящихся в плотноупакованном ряду с одинаковыми кинетическими энергиями на порядок и более превышающих пороговую энергию образования пары Френкеля. Обнаружено, что возникающие сверхзвуковые краудионы и *n*-краудионы неизбежно производят некоторое количество фокусонов. Число фокусонов может быть на единицу меньше или равно числу краудионов. Сумма количества фокусонов и краудионов всегда равна числу атомов, которым в начальный момент придали начальную скорость. Рассматривая пару атомов, находящихся на расстоянии в несколько межатомных расстояний друг от друга, которым сообщалась начальная кинетическая энергия выше пороговой энергии образования пар Френкеля, изучен механизм превращения краудиона в фокусон. Определены условия, при которых атомы, которым сообщают начальную кинетическую энергию намного превышающую энергию образования пары Френкеля, всегда образуют только краудионы.

Ключевые слова: метод молекулярной динамики, фокусон, краудион, *n*-краудион, кристаллическая решётка.

Благодарности: Работа СВД поддержана грантом Российского научного фонда № 24-11-00139.

Для цитирования: Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Дмитриев С.В., Сверхзвуковые краудин-фокусонные комплексы в 3D компьютерной модели кристалла Cu // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 282-289. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.004.

SUPERSONIC CROWDIN-FOCUSON TANDEMS IN 3D COMPUTER MODEL OF Cu CRYSTAL

Nikolay N. Medvedev^{1†}, Mikhail D. Starostenkov², Sergey V. Dmitriev³

¹ Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, Trofimov St. Biysk, 659305, Russia

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

³ Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 71 Oktyabrya Ave., 450054, Ufa, Russia

[†] nnm42@rambler.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-6040-6323>

² genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

³ dmitriev.sergey.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Abstract. In this paper, using the method of molecular dynamics using a modified Morse potential, the problem of excitation of n -crowdions in 3D models of FCC crystals is considered. The need to modify the Morse potential is due to the fact that when modeling the interaction of atoms at high speeds, it underestimates their diameters. A copper crystal model was used. The results of simultaneous triggering of several neighboring atoms located in a tightly packed row with the same kinetic energies by an order of magnitude and more exceeding the threshold energy of formation of a Frenkel pair were studied. Emerging supersonic crowdions and n -crowdions have been found to inevitably accompany a number of focusons. The number of focusons may be one less than or equal to the number of crowdions. The sum of the number of focusons and crowdions is always equal to the number of atoms that were initially given an initial speed. With the help of a pair of atoms located several interatomic distances from each other and to which the initial kinetic energy was communicated above the threshold energy of formation of Frenkel pairs, the mechanism of transformation of crowdion into focuson was studied. The conditions are determined under which atoms that are given an initial kinetic energy much higher than the energy of formation of a Frenkel pair always form only crowdions.

Keywords: molecular dynamics method, focuson, crowdion, n -crowdion, crystal lattice.

Acknowledgments: The work of SVD was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-11-00139.

For citation: Medvedev, N. N., Starostenkov, M. D., Dmitriev S.V. (2025). Supertonic crowdion-focuson complexes in 3D computer model of Cu crystal. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 282-289. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.004.

Введение

Междоузельный атом, находящийся в плотноупакованном ряду кристалла вызывает локальное сгущение атомов, которое называется краудионом. Этот дефект кристаллической решётки обладает высокой подвижностью. Скорость его перемещения вдоль плотноупакованного ряда может значительно превышать скорость звука, в связи с чем он играет заметную роль в переносе массы и энергии в неравновесных процессах. К таким процессам относятся, например, термообработка [1], пластическая деформация [2], радиационное воздействие [3-8], электростимулированная деформация [9,10] и др.

В работах [11, 12] предложена концепция n -краудиона, в [13-17] эта идея получила развитие. От обычного краудиона [18-20] n -краудион отличается тем, что образуется не

одним, а несколькими междоузельными атомами, находящимися в одном плотноупакованном ряду. Он также может обладать высокой скоростью. Очевидно, что такая группа междоузельных атомов обладает большей энергией, и как следствие, увеличивает дальность переноса энергии и массы внутри кристалла. Процесс перемещения n -краудионов может выступать как один из механизмов, вызывающих эффект дальнего действия, и эффект «малых доз» [21], например, в ионно-имплантированных металлических материалах [22, 23].

Фокусоны – это эстафетная передача импульса налетевшей частицы атомам кристалла с фокусировкой импульса вдоль плотноупакованного ряда [24, 25]. Этому эффекту уделяется значительно меньшее внимание, чем подвижным краудионам, несмотря на то, что

впервые мысль об их существовании была высказана Г. Венером ещё в 1955 году [26].

На сегодняшний день мы не нашли работ, в которых краудионы и фокусоны образовывали бы некий симбиоз и распространялись бы вместе единым целым. Настоящая работа посвящена рассмотрению случаев, когда краудионы и фокусоны образуют некое единое целое – краудионно-фокусонный тандем.

Методы

Компьютерные эксперименты проводились методом молекулярной динамики в 3D компьютерной модели ГЦК кристаллической решетки Си. Взаимодействие между атомами осуществлялось посредством модифицированного потенциала Морзе. Необходимость модификации потенциала Морзе вызвана тем, что при больших кинетических энергиях он занижает диаметры молекул.

Модификация заключалась в том, что к Морзе был добавлен отталкивающий потенциал Борна-Майера:

$$U(r) = D\beta(\beta e^{-2\alpha r} - 2e^{-\alpha r}) + \frac{cDa_0}{\delta} \exp\left(-\delta \frac{(r-a_0)}{a_0}\right). \quad (1)$$

В формуле (1) r -расстояние между атомами; a_0 - минимальное расстояние между атомами в невозмущённом кристалле; $c = 1 \text{ Å}^{-1}$ - размерный коэффициент, который в дальнейшем изложении опущен. Все коэффициенты (1) находятся из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i U_{V=V_0} = E_s \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^z \eta_i \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{V=V_0} = 0 \\ -V_0 \left(\frac{\partial P_s}{\partial V} \right)_{x=0} = K_0 \\ \frac{1}{3} + \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 (P_s \cdot V^{\frac{2}{3}})}{\partial V^2} \right) / \left(\frac{\partial (P_s \cdot V^{\frac{2}{3}})}{\partial V} \right) = -\gamma_0. \end{cases} \quad (2)$$

где η_i – число атомов в i – координационной сфере; z – количество учитываемых сфер; E_s – энергия сублимации атомов кристалла при нуле Кельвин; K_0 – объёмный модуль упругости; P_s – давление изоэнтропического сжатия; V_0 и V – удельные объёмы в начальном и деформированном состояниях; γ_0 – постоянная Грюнайзена.

Последнее уравнение в системе (2) необходимо для нахождения δ , и следует из формулы Дугдала – Мак – Дональда с учётом равенств между первым и вторыми производными от изоэнтропической зависимости давления при $V = V_0$ и изотермической, при нуле Кельвин [27, 28]. Подробности о том, из каких соображений получена система (2) и о том, какие получаются уравнения для расчёта коэффициентов потенциала (1) можно найти в работе [29].

Для изучения проблемы возбуждения краудион – фокусонного комплекса была создана расчётная ячейка размером $84 \times 12 \times 9$ частиц. В начальный момент времени температура ячейки задавалась равной нулю. На границы расчётной ячейки накладывались периодические условия.

Параметры потенциала Морзе были следующими, $D = 0.459 \text{ эВ}$, $\alpha = 0.393 \text{ Å}^{-1}$, $\beta = 0.496$, $a = 3.6 \text{ Å}$, $\delta = 14.74$. Визуализировалась одна из плоскостей (111) кристалла Си имеющего ГЦК решётку.

Результаты и обсуждения

В серии компьютерных экспериментов одному, двум, трём, четырём, и т.д. соседним атомам, находящимся в одном плотноупакованном ряду сообщалась одинаковая по модулю и по направлению скорость. Её величина была такова, чтобы кинетическая энергия атомов превышала минимальную энергию образования пары Френкеля. Для данного потенциала и рассматриваемого ГЦК кристалла Си она немного меньше 30 эВ, пороговая скорость образования пары, приблизительно, 68 А/пс. Начальные скорости атомов варьировались от 100 А/пс до 140 А/пс. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 1.

Чтобы получить одну пару Френкеля – вакансию и движущийся со сверхзвуковой скоростью краудион, нужно сообщить скорость одному или двум атомам см. рис 1 а), б). Чтобы получить две пары Френкеля, две вакансии, расположенные по соседству и 2-краудион, необходимо сообщить соответствующую начальную скорость трём или четырём атомам, см. рис 1 с), д). Для образования 3 пар Френкеля требуется чтобы в начальный момент времени импульсом обладали уже 5 или 6 атомов и т.д. см. рис 1 е), ф). Очевидно, что количество пар Френкеля, вакансий и краудионов, движущихся в группе не равно количеству атомов,

которым придали скорость в начальный момент времени.

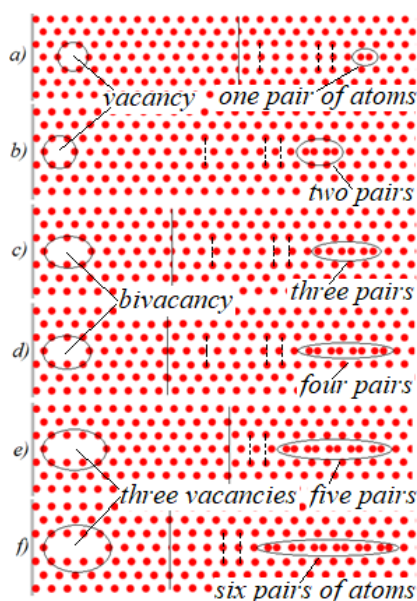


Рис.1. Образование пар Френкеля атомами с начальной скоростью $V_0 = 100 \text{ Å/ps}$. Скорость присваивалась а) единственному атому; б) двум соседним атомам; в) трём соседним атомам; д) четырём атомам; е) пяти атомам; ф) шести атомам. Вертикальная линия – место соединения двух частей изображения расчётного блока. Вертикальная пунктирная линия – перевал потенциала Пайерлса-Набарро

Fig.1: The formation of Frenkel pairs by atoms with an initial velocity $V_0 = 100 \text{ Å/ps}$. The velocity was assigned to a) a single atom; b) two adjacent atoms; c) three neighboring atoms; d) four atoms; e) five atoms; f) six atoms. The vertical line is the junction of two parts of the image of the calculation cell. Vertical dotted line shows the Peierls-Nabarro potential barrier

Обращает на себя внимание тот факт, что в процессе движения краудионов наблюдаются пульсирующие пары налетающих атомов и принимающих от них импульс покоящихся атомов. Число этих пар совпадает с числом атомов, которым была сообщена скорость в начальный момент времени. Однако не все эти пары образованы краудионами, т.к. число пар Френкеля и, следовательно, атомов, несущих краудионы меньше.

Из изложенного естественным образом встают два вопроса:

– почему не все атомы которым сообщили скорость в начальный момент времени образуют пары Френкеля?

– если не краудионами, то чем являются налетающие атомы в указанных парах?

Чтобы ответить на эти вопросы, были проведены эксперименты с несколько изменёнными начальными условиями.

Два атома также запускались с одинаковыми скоростями вдоль плотной упаковки, но уже на некотором расстоянии друг от друга. Результаты этих компьютерных экспериментов представлены для случая, когда оно равно 4 межатомным расстояниям, см. рис. 2. Благодаря такому расположению атомов можно легко увидеть причину, по которой второй атом в этой начальной конфигурации инициирует краудион, а первый инициирует изначально идеально сфокусированный фокусон. При этом оба атома, смещаясь со своего места, образуют сначала две вакансии и два краудиона, см. рис. 2 а).

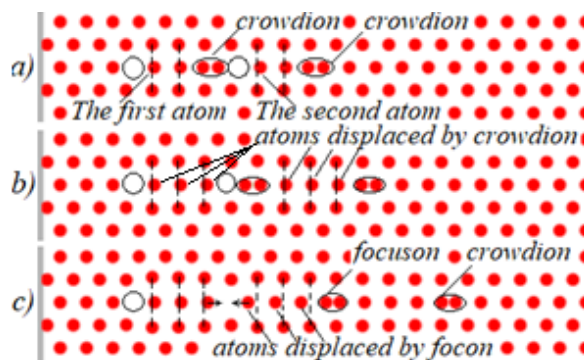


Рис.2. Процесс образования фокусон-краудинного тандема. а) Первый этап – две вакансии, два краудиона; б) второй этап – рекомбинация первого краудиона со второй вакансией; в) третий этап – движении фокусона и краудиона. Вертикальные пунктирные линии – перевалы потенциала Пайерлса-Набарро

Fig.2: The process of formation of the focus-crowdign tandem. a) The first stage - two vacancies, two crowdions; b) the second stage - recombination of the first crowdion with the second vacancy; c) the third stage - the movement of the focuson and crowdion. The vertical dashed lines are the Peierls-Nabarro potential barriers

Рассмотрим в деталях движение двух атомов, которым сообщили скорость в начальный момент времени. Преодолев потенциал Пайерлса-Набарро (пПН) каждый из атомов вытесняет соседний атом со своего места, со дна потенциальной ямы. При этом налетающий атом, почти полностью передав свой импульс соседнему атому не занимает его место, а оказывается на некотором расстоянии от этой точки, на спуске потенциала пПН. Атом, получивший импульс от соседа, точно также передаёт его своему соседу и

также остаётся на спуске потенциала пПН и т.д., см. рис. 2.

Краудион, инициированный вторым атомом, в процессе перемещения образует позади себя цепочку атомов, медленно, по сравнению со скоростью краудиона, спускающихся по склону пПН на дно потенциальной ямы.

Краудион, инициированный первым атомом пробегает короткий путь в 4 межатомных расстояния до вакансии, которая образовалась на том месте где до запуска программы находился второй атом. После чего, последний атом, несущий краудион инициированный первым атомом, рекомбинирует с вакансией, образованной на месте второго атома и далее инициирует фокусон, поскольку не может преодолеть пПН, т.к. его дальнейший путь закрыт вторым атомом, находящимся сразу за перевалом пПН, на его спуске. В результате остаётся одна вакансия – образованная первым атомом, один фокусон, и один краудион, образованный вторым атомом.

Считается, что фокусон переносит только импульс потому, что для образования пары Френкеля у него недостаточно энергии [22, 23]. В данных компьютерных экспериментах у фокусона достаточно энергии для образования вакансии и краудиона, но позиции атомов, стоящих на пути его распространения не позволяют ему образовать пару Френкеля.

Итак, зафиксируем: пусть имеются два атома, которым сообщается начальная скорость, превышающая критическую для создания пары Френкеля. При движении слева направо правый атом инициирует краудион, а расположенный за ним атом инициирует фокусон. Фокусон всегда следует за краудионом. Краудион при движении перебрасывает атомы через перевал пПН и оставляет их на спуске потенциала, фокусон не перебрасывает атомы через перевал пПН и оставляет их на его подъёме. Это правило хорошо иллюстрируется рис.1. Нечётное количество атомов с начальной скоростью образуют цепочку атомов на склоне, за перевалом пПН, чётное количество атомов образуют цепочку атомов на подъёме перед перевалом пПН.

Таким образом, если N_a число атомов, которым в начальный момент сообщили скорость, чётное, то $k = f = N_a/2$, где k – количество краудионов, f – количество фокусонов. Если же N_a – нечётное, то $k = N_a/2 + 1/2$, $f = N_a/2 - 1/2$.

Как уже отмечалось, выброшенные на склон пПН движущимся краудионом атомы плотноупакованного ряда, медленно дрейфуют в точку с минимальной потенциальной энергией. Следовательно, если всё время увеличивать расстояния между атомами которым сообщается начальная скорость, то в какой-то момент исчезнут условия для возбуждения фокусона и все атомы будут образовывать по паре Френкеля, т.е. вакансии и движущиеся краудионы. Это критическое расстояние практически не зависит от скорости атомов в начальный момент. Для нашей модели оно составило порядка 10 межатомных расстояний.

Заключение

Методом молекулярной динамики с использованием модифицированного потенциала Морзе рассмотрена проблема возбуждения n -краудионов в 3D модели ГЦК кристалла меди.

Было показано, что при одновременном запуске в одном направлении нескольких соседних атомов, находящихся в плотноупакованном ряду с одинаковыми кинетическими энергиями на порядок и более превышающих пороговую энергию образования пары Френкеля, возникающие сверхзвуковые краудионы и n -краудионы неизбежно сопровождается некоторое количество фокусонов. Число фокусонов может быть на единицу меньше или равно числу краудионов. Сумма количества фокусонов и краудионов всегда равна числу атомов, которым в начальный момент придали начальную скорость.

При помощи пары атомов, находящихся на нескольких межатомных расстояниях друг от друга, и которым сообщалась начальная кинетическая энергия выше пороговой энергии образования пар Френкеля, изучен механизм превращения краудиона в фокусон.

Показано, что существует предельное расстояние между атомами в одном плотноупакованном ряду, которым сообщают начальную кинетическую энергию намного превышающую энергию образования пары Френкеля, при превышении которого всегда образуются только краудионы. Показано, что возможно существование фокусонов с энергией достаточной для образования пары Френкеля.

Отметим также, что описанный эффект теснейшим образом связан с эффективным диаметром атомов. Поскольку с увеличением их скорости эффективный диаметр уменьшается, то и показанные в этой работе закономерности могут нарушаться и состав краудион-фокусонного тандема может измениться.

Список литературы

1. Mehrer H., Diffusion in Solids / Springer-Verlag, Berlin 2007. 645 p.
2. Indenbom V.L. Interstitial (crowdion) mechanism of plastic deformation and failure // JETP Lett. – 1970. – V.12. – P. 369–371.
3. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V., Pokropivny A.V. Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock // Model. Simul. Mater. Sc. – 1997. – 5. – P. 579.
4. Нацик В.Д., Смирнов С.Н. Дислокации и краудионы в двумерных кристаллах. Часть III: пластическая деформация кристалла как результат перемещения дефектов и их взаимодействие с полем напряжений // Физика Низких Температур – 2016 – Т. 42 (3) – С. 268-282.
5. Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // J. Nucl. Mater. – 2000. – 276. – P. 41.
6. Salehinia I., Bahr D.F. The impact of a variety of point defects on the inception of plastic deformation in dislocation free metals // Scripta Mater. – 2012. – 66. – P. 339.
7. Kononenko V.G., Bogdanov V.V., Turenko A.N., Volosyuk M.A., Volosyuk A.V. // Probl. At. Sci. Tech. – 2016. – 104. – P. 15.
8. Korbel A., Bochniak W. Stratified plastic flow in metals // Int. J. Mech. Sci. – 2017. – 128. – P. 269.
9. A.Y., Morkina, Alina Y., D.V., Tarov, Danila V., G.R., Khalikova, Gulnara R., A.S., Semenov, A. S., P.S., Tatarinov, Pavel S., I.A., Yakushev, I. A., S.V., Dmitriev, Sergey V. Comparison of the effect of electroplasticity in copper and aluminum (2024) Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 22 (4), P. 615.
10. A.Y., Morkina, Alina Y., D.V., Tarov, Danila V., I.A., Yakushev, I. A., P.S., Tatarinov, Pavel S., E.A., Korznikova, Elena A., S.V., Dmitriev, Sergey V. Effect of electroplasticity studied for aluminum wires under tension. (2024) Procedia Structural Integrity, 65, P. 158.
11. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В., Многочастичные краудионные столкновения // ФПСМ. – 2016. – Т. 13. - № 3. – С. 321-325
12. Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Chetverikov A.P., Zhou K., Velarde M.G. Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions // Phys. Status Solidi - RRL. – 2017. – V.11. – P. 1700298.
13. Korznikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A., Dmitriev S. Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions // Letters on Materials. – 2019. – V.9. – P. 386–390.
14. Bayazitov A.M., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Shepelev I.A., Fomin S.Y., Korznikova E.A. Features of mass transfer by N-crowdions in fcc Ni3Al lattice // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. – 2019. – P. 012033.
15. Korznikova E.A., Shepelev I.A., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V., Fomin S.Y., Zhou K. Dynamics and Stability of Subsonic Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal // J. Exp. Theor. Phys. – 2018. – V.127. – P. 1009–1015.
16. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // Phys. Lett. A. – 2020. – V.384. – P. 126032.
17. Сунгатова И.Р., Семёнов А.С., Баязитов А.М., Корзникова Е.А. Динамика сверхзвуковых 2-краудионов в нелинейных двумерных решетках // ФПСМ. – 2019. – Т.16, №4. С 482 – 488.
18. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Potekatev A.I., Kalugina V.V., Medvedev N.N., Neverova T.I., Barchuk A.A. The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials // Russian Physics Journal. - 2012 – V. 54. (11). P. 1241-1248.
19. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Захаров П.В. Фокусирующиеся и краудионные столкновения атомов в трёхмерной модели упорядоченного сплава CuAu со сверхструктурой L₁₁ // Перспективные Материалы. – 2011. - №12 – С. 321 – 326.
20. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Zakharov P.V., Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel // Computational Materials Science. – 2009. V.47(2). P 429-431.
21. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. – М.: Энергоатомиздат, 2001. - 286 с.
22. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. / НТЛ, Томск - 2004. - 326 с.

23. Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Kadyrov R.I., Rudenski G.E., Sharkeev Yu.P. The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation // *Technical Physics Letters*. - 1999. - V. 25 (3). - P. 209 -211.
24. Silsbee R.H. Focusing in Collision Problems in Solids // *Journal of Applied Physics*. - 1957. - V.28 (11) - P. 1246 - 1250.
25. Гарбер Р.И., Федоренко А.И. Фокусировка атомных столкновений в кристаллах // *УФН*. - 1964. - Т. 83 (3). - С 185 - 432.
26. Wehner G. K. Sputtering of Metal Single Crystals by Ion Bombardment // *Journal of Applied Physics*, 1955. - V. 26. (8) - P. 1056-1057.
27. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Физматгиз, Москва 1963. 632 с.
28. Попов А.Г., Бородай В.Э., О построении уравнений состояния твёрдых тел с использованием потенциалов межатомного взаимодействия // *Изв. Вуз. Физика*. - 2005 Т. 48 (3). - С.3 - 8.
29. Медведев Н.Н., Старостенков М.Д., Шайхутдинова Т.А. Модификация потенциала Морзе для моделирования взаимодействия атомов, обладающих высокой энергией // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2011. - Т.8 (1). - С. 99 - 104.
2. Indenbom V.L. Interstitial (crowdion) mechanism of plastic information and failure // *JETP Lett.* - 1970. - V.12. - P. 369-371.
3. Pokropivny V.V., Skorokhod V.V., Pokropivny A.V. Adhesive phenomena at the alpha-Fe inter-face during nanoindentation, stretch and shock // *Model. Simul. Mater. Sc.* - 1997. - 5. - P. 579.
4. Natsik V.D., Smirnov S.N. Dislocations and crowdions in two-dimensional crystals. Part III: Plastic deformation of the crystal as a result of defect movement and defect interaction with the field of elastic stresses // *Physica nizkih temperatur (Physics of Low Temperatures)*. - 2016. - V. 42 (3) - P. 268 - 282.
5. Kiritani M. Similarity and difference between fcc, bcc and hcp metals from the view point of point defect cluster formation // *J. Nucl. Mater.* - 2000. - 276. - P. 41.
6. Salehinia I., Bahr D.F. The impact of a variety of point defects on the inception of plastic deformation in dislocation free metals // *Scripta Mater.* - 2012. - 66. - P. 339.
7. Kononenko V.G., Bogdanov V.V., Turenko A.N., Volosyuk M.A., Volosyuk A.V. // *Probl. At. Sci. Tech.* - 2016. - 104. - P. 15.
8. Korbel A., Bochniak W. Stratified plastic flow in metals // *Int. J. Mech. Sci.* - 2017. - 128. - P. 269.
9. Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Korznikova E.A., Dmitriev S.V. (2016) Multi-particle crowdion collisions // *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*. 13, 321-325. (In Russ.).
10. Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Chetverikov A.P., Zhou K., Velarde M.G. Highly Enhanced Transport by Supersonic N-Crowdions // *Phys. Status Solidi - RRL*. - 2017. - V.11. - P. 1700298.
11. Korznikova E., Sunagatova I., Bayazitov A., Semenov A., Dmitriev S. Effect of interatomic potentials on mass transfer by supersonic 2-crowdions // *Letters on Materials*. - 2019. - V.9. - P. 386-390.
12. Bayazitov A.M., Dmitriev S.V., Zakharov P.V., Shepelev I.A., Fomin S.Y., Korznikova E.A. Features of mass transfer by N-crowdions in fcc Ni3Al lattice // *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* - 2019. - P. 012033.
13. Korznikova E.A., Shepelev I.A., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V., Fomin S.Y., Zhou K. Dynamics and Stability of Subsonic

Информация об авторах

Н. Н. Медведев – доктор физико-математических наук, профессор Бийского технологического института.

М. Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

С.В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник института проблем сверхпластичности металлов РАН; профессор Национального исследовательского Томского государственного университета.

References

1. Mehrer H., *Diffusion in Solids* / Springer-Verlag, Berlin 2007. 645 p.

- Crowdion Clusters in 2D Morse Crystal // J. Exp. Theor. Phys. – 2018. – V.127. – P. 1009–1015.
14. Shepelev I.A., Korznikova E.A., Bachurin D.V., Semenov A.S., Chetverikov A.P., Dmitriev S.V. Supersonic crowdion clusters in 2D Morse lattice // Phys. Lett. A. – 2020. – V.384. – P. 126032.
15. Sungatova I.R., Semenov A.S., Bayazitov A.V., Korznikova E.A. (2019) Dynamics of Supersonic 2-Crowdions in Nonlinear Two-Dimensional Lattices // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 16, 482–488. (In Russ.).
16. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Potekatev A.I., Kalugina V.V., Medvedev N.N., Neverova T.I., Barchuk A.A. The Behavior of Crowdions and Their Complexes in Weakly States of Materials // Russian Physics Journal. - 2012 – V. 54. (11). P. 1241-1248.
17. Medvedev N.N., Starostenkov M. D., Markidonov A.V., Zakharov P.V. (2011) Self-focusing and crowding collisions of atoms in a three-dimensional model of an ordered CuAu alloy with superstructure L_{11} // Perspektivnye Materialy (Promising materials). – №12 – P. 321 – 326. (In Russ.).
18. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V., Medvedev N.N., Zakharov P.V., Crowdion Mobility and Self Focusing in 3D and 2D Nickel // Computational Materials Science. – 2009. V.47(2). P 429-431.
19. Mamontov A.P., Chernov I. P. Effect of small doses of ionizing radiation /Energoatomizdat, 2001. – 286 p. (In Russ.).
20. Didenko A.N., Shakreev Jy.P., Kozlov E. V., Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Long-range effects in ion-implanted metal materials. / NTL, Tomsk - 2004. - 326 p. (in Russ.).
21. Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Kadyrov R.I., Rudenski G.E., Sharkeev Yu.P. The Possibility of forming Soliton-Like Pulses During Implantation // Technical Physics Letters. - 1999. - V. 25 (3). - P. 209 -211.
22. Silsbee R.H. Focusing in Collision Problems in Solids // Journal of Applied Physics. – 1957. – V.28 (11) – P. 1246 – 1250.
23. Garber R.I., Fedorenko A.I. Focusing of atomic collisions in crystals // Phys. Usp. – 1964. – V. 7 (4). – P. 479 – 507.
24. Wehner G. K. Sputtering of Metal Single Crystals by Ion Bombardment // Journal of Applied Physics, 1955. – V. 26. (8) – P. 1056-1057.
25. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena / Dover Publications, INC. Mineola, New York 2002. 896 p.
26. Popov A.G., Borodai V.E. On the Construction of Equations of State For Solids with the Use of Interatomic Interaction Potentials // Russian Physics Journal. – 2005 V. 48 (7). – P. 665 – 670.
27. Medvedev N.N., Starostenkov M.D., Shaihutdinova T.A. Modification of the Morse potential to simulate the interaction of atoms with high energy // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). – 2011. – T.8 (1). – C. 99 – 104. (In Russ.).

Information about the authors

N. N. Medvedev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University.

M. D. Starostenkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

S.V. Dmitriev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Lab., Institute of Molecule and Crystal Physics, UFRC of RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 30 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.