ЖУРНАЛ НАНО- ТА ЕЛЕКТРОННОЇ ФІЗИКИ *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS*
Том **9** № 2, 02012(4сс) (2017) Vol. **9** No 2, 02012(4pp) (2017)

Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии наноразмерных объектов

В.В. Марасанов, А.А. Шарко*

Херсонский национальный технических университет, ул. Бериславское Шоссе, 24, 73008 Херсон, Украина

(Получено 28.12.2016; в отредактированной форме – 25.04.2017; опубликовано online 28.04.2017)

Предложена одномерная дискретно-континуальная модель энергетического спектра сигналов акустической эмиссии, позволяющая отфильтровать осциллирующие составляющие сигналов акустической эмиссии. Представлен математический формализм описания среды, инициирующей сигналы акустической эмиссии, в котором проблема спектрального анализа и синтеза сигналов акустической эмиссии решается с помощью преобразования Фурье. Установлена зависимость спектра акустических колебаний от размеров параметров исследуемой микроструктуры. Показана возможность использования аппарата функций дискретных аргументов структуры наноразмерных объектов в континуальной теории сплошной среды, инициирующей сигналы акустической эмиссии.

Ключевые слова: Спектр, Акустические волны моделирование, Континуум, Дискретизация.

DOI: 10.21272/jnep.9(2).02012 PACS number: 43.40.Le, 46.70. – p 06.60.Ei

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения энергетического спектра сигналов акустической эмиссии (АЭ) наноразмерных объектов объясняются важностью решения вопросов о характеристиках распространения акустических колебаний предшествующих разрушению материалов. Теоретическое объяснение изменения структуры наноразмерных объектов развивается по двум направлениям дискретные модели [1, 2] и континуальные [3, 4]. Связать эти взаимно противоположные и исключающие представления в рамках единой среды не представляется возможным. Вместе с тем характерной особенностью энергетического спектра АЭ сигнала является двойственный механизм образования сигналов АЭ: дискретный характер изменений структуры [5, 6] и непрерывное распространение акустических волн [7, 8].

Установление границ применимости дискретных представлений изменений структуры материалов и континуальной модели распространения акустических колебаний в среде является одной из не решённых задач наноструктурного моделирования АЭ сигналов и физики наносистем.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР СИГНАЛОВ АЭ. ДИСКРЕТНЫЕ И КОНТИНУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ.

Возникновение сигналов АЭ и обнаружение развивающихся дефектов порождается стохастическими процессами, которые недоступны непосредственному наблюдению и фиксируются только их внешнее проявления. При этом неизбежна начальная неопределённость фазы процесса разрушения. Природа такой неопределённости объясняется искажениями сигнала АЭ при его распространении от места генерации до точки приема.

Согласно принципа неопределенности, чем лучше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размыта в частотной области. При изменении масштаба функций произведение плотностей вероятности временного и частотного диапазонов остается постоянным. Это положено в основу теоретического обоснования настоящей работы.

Выбор преобразований Фурье для анализа спектра сигналов АЭ объясняется следующем образом. Преобразование Фурье сохраняет энергию сигнала. Оно имеет смысл только для сигналов конечной продолжительности, энергия которых конечна. Спектр таких исходных сигналов быстро приближается к нулю. Эти положения находятся в полном соответствии с физическим смыслом явления акустической эмиссии.

Одним из главных свойств преобразования Фурье является независимость амплитудного спектра от сдвига сигнала во времени. При перемещении функции изменяется только ее фазовый спектр.

Фурье-образ реального сигнала обладают симметрией: амплитудный спектр всегда является четной функцией. Это позволяет сводить сложные функции и их Фурье-образы к более простым. Спектр суммарной функции времени равен сумме спектров ее составляющих.

При построении модели энергетического спектра сигналов акустической эмиссии наноразмерных объектов вводятся следующие допущения:

- локальность, т.е. ограниченность изменения структуры в пространстве среды;
- динамичность протекающих процессов;
- сигнал к точке излучения представляет собой импульсный пуассоновский процесс;
- Фурье-образ АЭ сигнала имеет стационарные характеристики.

Коэффициенты преобразования Фурье находятся путем вычисления скалярного произведения сигнала с комплексными экспонентами:

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt\,, \qquad (1)$$

где $f(t)$ – сигнал, $F(\omega)$ – преобразование Фурье.

Форма распространяющегося АЭ сигнала зависит

* sharko_artem@ukr.net

не только от времени смещения t, но и от частоты ω. Поэтому наряду с функциями смещения u во времени $u(t)$ следует рассматривать их Фурье-образы $u(\omega)$, связанные соотношениями:

$$u(\omega) = \int u(t)e^{i\omega t}dt \qquad (2)$$

$$u(t) = \frac{1}{2\pi}\int u(\omega)e^{-i\omega t}d\omega \qquad (3)$$

Дискретная структура наноразмерных объектов характеризуется близкодействием взаимодействия составляющих элементов, в то время как непрерывная среда характеризуется дальнодействием. Предельный переход от дискретной системы материальных точек к сплошной среде должен сопровождается переходом от системы линейных уравнений, описывающих дискретные точки, к дифференциальным уравнениям незатухающих осциллирующих волн, присутствующих в среде за фронтом разрушения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из важнейших элементов подобного аппарата математической физики является понятие квазиконтинуума, позволяющего в рамках единого формализма рассматривать дискретные и непрерывные модели.

Под квазиконтинуумом понимают одномерное x-пространство и заданный на нем класс допустимых функций (рис. 1)

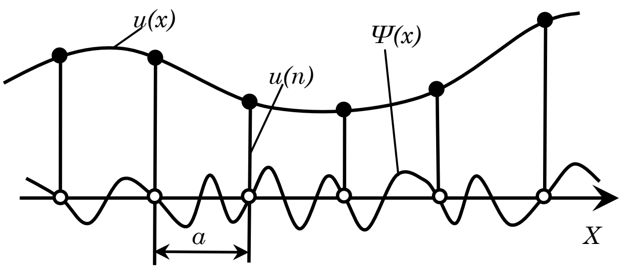

Рис. 1 – Одномерный квазиконтинуум

Будет считать $a = const$, не зависящей от n. Значение функции в узлах обозначим как $u(n)$. В точках $x = na$ функция $u(x)$ принимает значения $u(na)$ которые представляют собой смещения колеблющей точки.

Характеристиками акустического излучения, являются: амплитуда, амплитудное распределение, амплитудно-временное распределение, общее число зарегистрированных импульсов за время наблюдения, плотность вероятности того, что амплитуда сигналов находится в заданном интервале, доля времени наблюдения, в течении которого регистрируемая величина находится вблизи заданного значения амплитуд, распределение временных интервалов между отдельными импульсами [8]. Несмотря на их многообразие общей их чертой является огибающая импульсов АЭ, характеризующая их относительную энергию (рис. 2).

Задачей рассмотрения одномерного континуума, является интерполяция функции смещения в узлах и выбор из всего множества интерполирующих функций $u(x) + \Psi(x)$ наиболее гладкой, для того чтобы отфильтровать быстро осциллирующие составляющие сигналов АЭ.

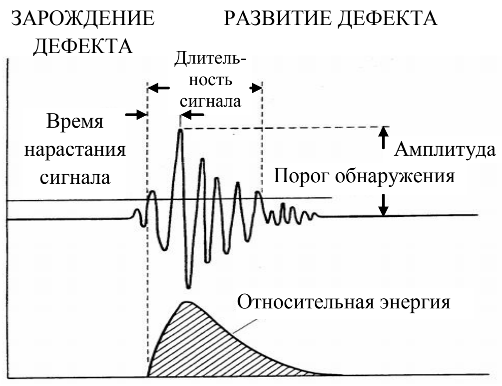

Рис. 2 – Типичная форма АЭ сигнала

Наряду с функцией $u(x)$ будем рассматривать ее Фурье-преобразование. Функция $u(x)$ может быть представлена в виде суперпозиции Фурье-гармоник, частота осцилляций которых неограниченно возрастает при $k \to \infty$. Здесь $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор; λ – длина волны.

В основе преобразования Фурье лежит идея представления любой периодической функции в виде суммы отдельных гармонических составляющих синусоид и косинусоид с различными амплитудами и частотами. Преобразование Фурье ставит в соответствие каждой функции действительного переменного его спектр или Фурье-образ, используя комплексные числа.

В Фурье-преобразовании изменяется аргумент и в нашем случае вместо x будет k, а вместо $u(x)$ соответственно $u(k)$.

Для функции $u(x)$ преобразование Фурье будет иметь вид:

$$u(k) = \int e^{-ikx}u(x)dx \qquad (4)$$

Здесь $u(x)$ и $u(k)$ рассматриваются как представления одной и той же функции u в изоморфных x и k пространствах с различными функциональными базисами. Соответственно $u(x) \leftrightarrow u(k)$:

$$u(x) = \frac{1}{2\pi}\int e^{ikx}u(k)dk \qquad (5)$$

Функция $u(x)$ является искомой интерполирующей функцией, имеющей Фурье-образ $u(k)$. Таким образом любой функции $u(n)$ взаимно однозначно сопоставляются функции $u(x)$ и $u(k)$.

Стремление к получению гладкой функции $u(x)$ эквивалентно ограничению минимально возможной области k. Если исходный спектр имеет конечную ширину при большой частоте дискретизации, то можно восстановить исходный сигнал, определив компоненту спектра в районе нуля и ограничив отрезки, уходящие в бесконечность. Согласно выражения для искомой, интерполирующей функции $u(x)$ в гармоническом приближении ее Фурье-образы $u(k)$

будут отличны от нуля лишь на отрезке $B\ [-\pi/a \le k \le \pi/a]$, где B – характеристическая функция одномерного континуума (рис. 3).

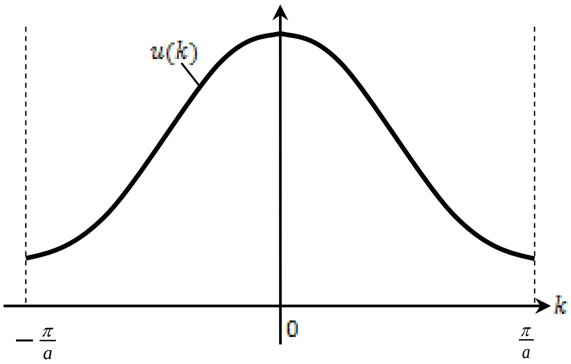

Рис. 3 – Фурье-образ интерполирующей функции АЭ сигнала наноразмерного объекта

Поскольку $u(k)$ отлична от нуля лишь на отрезке B, то $u(x)$ продолжается в комплексную область как целая аналитическая функция экспоненциального типа $\le \pi/a$.

Согласно рис. 3 функция $u(k)$ отлична от нуля лишь на отрезке B. Следовательно, в n-, x- и k- представлениях, где n – дискретное представление, x-квазиконтинуальное, k – Фурье-преобразование справедливы соотношения:

– коэффициенты ряда Фурье

$$u(n) = \frac{1}{2\pi}\int_B e^{inak} u(k)dk \qquad (6)$$

– преобразование Фурье

$$u(k) = \frac{1}{2\pi}\int e^{-inx} u(x)dx \qquad (7)$$

– интерполирующая функция

$$u(x) = \frac{1}{2\pi}\int e^{inx} u(k)dk \qquad (8)$$

Учитывая, что на отрезке B величина $au(n)$ быстро убывает с ростом n функцию $u(k)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$u(k) = B(k)\sum_n au(n)e^{-inak} \qquad (9)$$

Преобразование дискретных сигналов, вызванных напряжениями в структуре материала, в непрерывную аналитическую функцию типа $\le \pi/a$ с использованием рядов Фурье возможно через набор δ – функций.

В нашем случае δ-функция представляется интегралом Фурье:

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^\infty e^{i\omega t} d\omega \qquad (10)$$

Такая форма записи δ-функции через параметр решетки π/a позволяет соединить близко и дальнодействие возмущающих воздействий. Таким образом, любой функции смещения $u(n)$ взаимно однозначно сопоставляются функции $u(x)$ и $u(k)$.

С учетом этого, для линейной цепочки точечных масс наноструктурных объектов в гармоническом приближении функция Лагранжа в инвариантной форме, относительно n-, x- и k- представлений будет иметь вид:

$$L = \frac{1}{2}\langle \rho\dot{u}(t) | \dot{u}(t)\rangle - \frac{1}{2}\langle u(t)|\Phi|u(t)\rangle + \langle u(t)|q(t)\rangle \quad (11)$$

Здесь ρ и $q(t)$ имеют смысл плотностей масс и внешних сил.

Смещению $u(t)$ в n-, x- и k- – представлениях соответствуют $u(n, t)$, $u(x, t)$ и $u(k, t)$. Уравнение движения, полученное из лангранжиана в пространственно-временных представлениях, имеет вид:

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) + \int \Phi(x,x')u(x',t)dx' = q(x,t) \qquad (12)$$

Используя преобразование Фурье по (x, t) можно получить это же уравнение в k- и ω- представлениях.

$$-\frac{\omega^2}{2\pi}\rho(k)u(k,\omega) + \int \Phi(k,k')u(k',\omega)dk' = q(k,\omega) \quad (13)$$

Модель сплошной среды можно использовать и в случае неравномерно изменяющейся деформации, если деформация изменяется достаточно медленно в масштабах взаимодействия размеров ячейки. При этом необходимо, чтобы перемещения изменялись не только по координатам, но и во времени.

ВЫВОДЫ

Приведенные формулы устанавливают взаимно-однозначное соответствие между спектральными характеристиками дискретной структуры наноразмерных объектов и характеристиками распространения АЭ сигналов в терминах непрерывного континуума сплошной среды.

Спектр акустических колебаний выражается через Фурье-образ, сосредоточенный на отрезке, определяющем геометрические размеры элементарной ячейки исследуемой микроструктуры.

Енергетичний спектр сигналів акустичної емісії нанорозмірних об'єктів

В.В. Марасанов, А.О. Шарко

Херсонський національний технічних університет, вул. Бериславське шосе, 24, 73008 Херсон, Україна

Запропоновано одномірна дискретно-континуальної модель енергетичного спектра сигналів акустичної емісії, що дозволяє відфільтрувати осцилюючі складові сигналів акустичної емісії. Представлений математичний формалізм опису середовища, що ініціює сигнали акустичної емісії, в якому проблема спектрального аналізу і синтезу сигналів акустичної емісії вирішується за допомогою перетворення Фур'є. Встановлено залежність спектра акустичних коливань від розмірів параметрів досліджуваної мікроструктури. Показана можливість використання апарату функцій дискретних аргументів структури нанорозмірних об'єктів в континуальної теорії суцільного середовища, що ініціює сигнали акустичної емісії.

Ключові слова: Спектр, Акустичні хвилі моделювання, Континуум, Дискретизація.

The Energy Spectrum of the Acoustic Emission Signals of Nanoscale Objects

V.V. Marasanov, A.A. Sharko

Kherson National Technical University, 24, Berislav Highway Str., 73008 Kherson, Ukraine

A one-dimensional discrete-continuum model of the energy spectrum of the acoustic emission signal, allowing filter oscillating components of the acoustic emission signals. The mathematical formalism describing the environment, initiating the signals of acoustic emission, in which the problem of spectral analysis and synthesis of acoustic emission signals is solved by the Fourier transform. The dependence of the spectrum of acoustic vibrations on the size of the parameters, microstructure. The possibility of using the machine's functions of discrete argument structure of nanoscale objects in the continuum theory of continuous medium, initiating acoustic emission signals.

Keywords: Spectrum, Acoustic wave modeling, Continuum discretization.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.V. Bojko, A.M. Grisschuk, *J. Nano-Electron. Phys.* **8** No 4, 04001 (2016).
2. L.Y. Kozak, *Physico-Chemical Mechanics of Materials* No 1, 15 (2016).
3. R.V. Goldshtein, S.V. Kuznetsov, *J. Computational Continuum Mechanics* **8** No 1, 35 (2015).
4. A.I. Potapov, I.S. Pavlov, S.A. Lisina, *J. Sound Vibration* **322**, 564 (2009).
5. V. Marasanov, A. Sharko, *Int. Fronter Sci. Lett.* **10**, 37 (2016).
6. A. Carpinteri, *Engineering Fracture Mechanics* **74**, 273 (2007).
7. A.A. Lependin, V.V. Polyakov, *J. Techn. Phys.* **84** No 7, 97 (2014).
8. V.V. Marasanov, A.A. Sharko, V.V. Kobersky, *Vistnyk of Kherson National Technical University* **2**, 60 (2016).