Баенова Г.М., Сеньковская А.А.**Обзор фононных кристаллов и акустических метаматериалов***Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева
(Казахстан, Нур-Султан)*

doi: 10.18411/lj-04-2021-03

Аннотация

В представляемой обзорной работе проведено исследование научных публикаций по вопросам создания моделей физических процессов, происходящих при распространении упругих волн звуковой частоты в кристаллах, по своим структурным характеристикам, относящимся к средам с фононными свойствами. В обзоре проведён анализ работ как имеющих длительную историю и, на этом основании, неоднократно подтверждённых на практике, так и недавних публикаций, в которых отмечены достижения современной фооники. Даны определения основных понятий фооники как раздела акустики, рассмотрены характерные свойства фононных кристаллов. Описаны принципы работы акустических диодов и акустических фононных звуковых поглотителей, основные технические характеристики которых нашли широкое применение в самых разных областях современной техники.

Ключевые слова: фонон, акустические метаматериалы, кристаллическая среда, упругие колебания.

Abstract

In the present review paper, a study of scientific publications on the creation of models of physical processes occurring during the propagation of elastic waves of sound frequency in crystals, according to their structural characteristics related to media with phonon properties, is carried out. The review analyzes works that have a long history and, on this basis, have been repeatedly confirmed in practice, as well as recent publications that highlight the achievements of modern phononics. The definitions of the basic concepts of phononics as a branch of acoustics are given, and the characteristic properties of phonon crystals are considered. The principles of operation of acoustic diodes and acoustic phonon sound absorbers are described, the main technical characteristics of which are widely used in various fields of modern technology.

Key words: phonon, acoustic metamaterials, crystal medium, elastic vibrations.

Современная физика позволяет осуществлять управление процессами распространения колебаний не только посредством воздействия на источник этих колебаний, но и путём активного изменения свойств самой среды распространения. Эта область физической науки называется фооникой. В современной инструментрии фооники существуют устройства, разработанные для управления процессами распространения упругих колебаний среды согласно заранее программируемым изменениям свойств этой среды.

В статье [1] достаточно подробно и просто, но на хорошем научном уровне показана область изучения и практического применения фооники.

Для полной характеристики фооники как раздела физики необходимо напомнить, что, как и любое явление в физическом поле, звуковые волны имеют квантовую природу. Теория поля показывает, что энергия волны колебаний плотности среды заданной частоты, возбужденная в материальном теле определенного размера, может иметь значение, превышающее некоторый минимальный порог, аналогично фотоэффекту, объяснённом Эйнштейном с помощью введения в физику понятия квантов электромагнитного поля как физической реальности.

Термин «фонон», по понятной аналогии, образован подобно понятию фотона в квантовой электронике. Как и в ситуации с классической, или ньютоновой, механикой

и квантовой механикой, квантовые эффекты в акустике не играют заметную роль при исследовании макроскопических процессов. При углублении в структурное строение материальной среды, при переходе к тонким акустическим явлениям, например, при исследованиях колебаний среды на сверхвысоких частотах, то есть при изучении области тепловых фононов, к которой относятся разработка мощного источника когерентных фононов (акустического лазера) или процесс вычисления теплоёмкости кристаллических тел, возникает необходимость построения квантовой теории этих явлений.

По определению физическая природа звука отождествляет его с колебательным процессом изменения величины давления среды и, как следствие этого, плотности среды распространения этих колебаний. Из классических исследований колебательных процессов любой природы известно, что любая колебательная система имеет один из главных своих параметров, называемый собственной частотой этой колебательной системы. В публикации [3] весь частотный диапазон упругих колебаний среды, называемый звуком, можно разделить на несколько поддиапазонов, высота которых может быть оценена человеческим слуховым аппаратом или соответствующим техническим устройством. Кроме этого, от частоты звуковых волн зависит характер возникающих разных физических процессов в среде распространения звука. На рисунке 1 представлена шкала примерного разделения всего диапазона частот упругих колебаний среды, относящихся к звуковым, от 1,0 Гц до 1,0 ТГц. Отметим, что частота звуковых волн, воспринимаемых слуховым аппаратом человека, принадлежит диапазону от 16,0 (по некоторым источникам 20,0) Гц до 20,0 кГц.

Рис. 1. Схема спектра частот упругих колебаний вещества от инфразвуковых значений, не воспринимаемых человеком, до сверхвысокочастотных, уже тепловых, колебаний. Изображение из обсуждаемой работы [3].

В рассматриваемой работе дано краткое определение каждого из отмеченных выше поддиапазонов звука:

- инфразвуковой (0 - 16 Гц);
- звуковой (16 Гц - 20 кГц);
- ультразвуковой (20 кГц - 100,0 МГц);
- гиперзвуковой (100 МГц - 100,0 ГГц);
- поддиапазон тепловых колебаний (1,0 ТГц и выше). Этот поддиапазон колебаний является фактически тепловыми колебаниями. Таким излучением акустика уже не занимается.

Здесь важно отметить, что длина волны таких колебаний коррелируется с расстояниями между молекулами и атомами вещества. Таким образом, атомная и молекулярная дискретности любой среды распространения колебаний накладывает ограничение на значения верхнего предела частот колебаний в ней. Отмечено, что для звуковых волн в газе верхний предел диапазона частот лежит гораздо ниже, чем в твёрдых телах и жидкостях.

В работе [4] достаточно подробно и чётко представлено научное определение понятия фонон. Отмечается, что в металлах, имеющих кристаллическую решётку,

теплопроводность обеспечивается электронами проводимости, передающими свою кинетическую энергию внутри металлической среды.

Если диэлектрическая среда имеет кристаллическую структуру, то в ней теплопередача осуществляется за счёт связанных колебаний узлов кристаллической решётки. Описан теоретический подход описания данного процесса как распространение упругих волн в виде пакета i гармоник с различными частотами величины ν_i . При переходе к понятиям квантовой механики каждой i -той волне сопоставляется некая квазичастица, называемая фононом. Каждый фонон обладает энергией, равной $h\nu_i$ и импульсом $h\nu_i/v$, где h – постоянная Планка, а v – скорость распространения упругих волн или, в терминах этой работы, скорость распространения звука.

Процесс передачи тепла в кристаллической решетчатой среде рассматривается как движение фононов в этой среде.

При этом фононам сопоставляются некоторые параметры, характерные обычным частицам. Например, аналогом средней длины свободного пробега молекулы вещества является средняя длина свободного пробега фононов рассматриваемой среды $\bar{\lambda}$.

В рассматриваемой работе получена важная формула для вычисления коэффициента теплопроводности кристаллов:

$$K = \frac{1}{3} cv \bar{\lambda},$$

где c – удельная объёмная теплоёмкость среды, v – скорость распространения звука, $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега возбуждаемых фононов.

Приводятся численные значения указанных параметров, например, для решётки NaCl при температуре среды распространения 0°C и значениях $c = 0,45$ кал/см² и $K = 0,17$ кал/(см*град*с), средняя длина свободного пробега фонона $\bar{\lambda} = 23 \cdot 10^{-8}$ см. Это в четыре раза больше расстояния d между соседними атомами кристаллической решётки этой среды распространения звуковой волны, называемом периодом кристаллической решётки.

В работе отмечено, что $\bar{\lambda}$ фононов прямо зависит от их геометрического рассеяния, такого, как рассеяние на границах кристалла или дефектов его кристаллической решётки, или, вообще, на аморфных областях этого вещества.

Указано на существование такого явления, как рассеяние фононов на фононах. Это явление происходит только при ангармонических колебаниях узлов кристаллической решётки, но не при гармонических. Важным является уточнение, что рассеяние фононов на фононах при высоких температурах, таких, что $T > T_c$, где T_c – характеристическая температура кристаллической среды, описывается соотношением $\bar{\lambda} \sim \frac{1}{T}$.

Напротив, при $T \ll T_c$, $\bar{\lambda} \sim e^{-T_c/2T}$.

Отмечается, что заметный характер геометрическое рассеяние приобретает при больших значениях $\bar{\lambda}$, которые сравнимы с периодом кристаллической решётки среды распространения звука. Тогда при низких температурах происходит резкое уменьшение величины теплопроводности в чистых от примесей кристаллах и верно соотношение $K \sim \frac{1}{2} cvd$.

Если значение температуры не очень близко к нулю, то $K \sim \frac{1}{T}$, так как $\bar{\lambda} \sim \frac{1}{T}$.

Если значение температуры кристаллической среды близко к нулю, то $K \sim T^2$, как следствие зависимости $c \sim T^2$.

В книге [5] при описании фононов используется понятие частоты ν_i моды колебаний в объёме кристаллической среды. При этом отмечается высокая эффективность применения понятия фононов для применения математических

аппаратов квантовой механики при вычислении значений параметров фононов, и аналогичными параметрам фотонов. Эта аналогия приводит к выводам о волновой природе фононов и допустимости применения математических инструментов квантовой механики. Однако, несмотря на это сходство, физическая природа фотонов и фононов совершенно различна. Фотоны являются материальными частицами, а фононы относятся к так называемым квазичастицам, которые определяют как нормальные моды соответствующих возбуждений в средах с определённой геометрией. Например, фононы аналогичны поляритонам. О такой аналогии ниже будет сказано несколько подробнее.

В большинстве работ, посвящённых этой области акустики, отмечается, что модель оптимального акустического поглотителя в настоящее время разработана в недостаточной для широкого практического применения степени [2, 6]. Обращается внимание на то, что в большинстве публикаций, исследующих явление оптимального поглощения, основное внимание уделено электронике, электродинамике и оптике, а акустические явления в этом направлении недостаточно изучены.

Современное развитие технологий в самых разных областях науки и практики требует разработок материалов с всё более и более специальными требованиями к их свойствам.

Представленная статья даёт описание строения структур фононных кристаллов и метаматериалов, а также технических конструкций и устройств, разработанных на базе применения таких материалов.

Такие разработки нашли практическое применение не только как материалы для производства тех или иных элементов функциональных схем сложных технических устройств, но и как законченные и готовые к практической работе изделия.

1. T. Gorishnyy, M. Maldovan, C. Ullal, and E. Thomas. Sound ideas // Physics World 2005, December.
2. M. Maldovan. Sound and heat revolutions in phononics // Nature. 14 November 2013. V. 503. P. 209.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия // М., «Советская энциклопедия», 1979.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов // М., Наука 1979, с. 274-275.
5. Матвеев А.Н. Молекулярная физика; учеб. пособие для ВУЗов // М., Высшая школа, 1981, с. 325.
6. L. Bragg, J. Nye. A dynamical model of a crystal structure // Proceedings of the Royal Society of London, vol. 190, p.474, 1947.

Богомолов Д.Н., Нестеров Ю.Г.
Сравнительный анализ ITIL3 и ITIL4

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-04-2021-04

Аннотация

Статья посвящена новой версии методологии по управлению ИТ-услугами ITIL. Описываются этапы развития методологии, также уделяется внимание ключевым особенностям каждой версии. Производится обзор и сравнительный анализ изменений, произошедших при выходе четвёртой версии методологии в 2019г. по сравнению с предыдущей версией.

Ключевые слова: ИТ-услуга, практика, процесс, инцидент, служба поддержки.

Abstract

The article is devoted to the new version of the methodology for managing IT services ITIL. The stages of development of the methodology are described, and attention is also paid to the key features of each version. A review and comparative analysis of the changes that