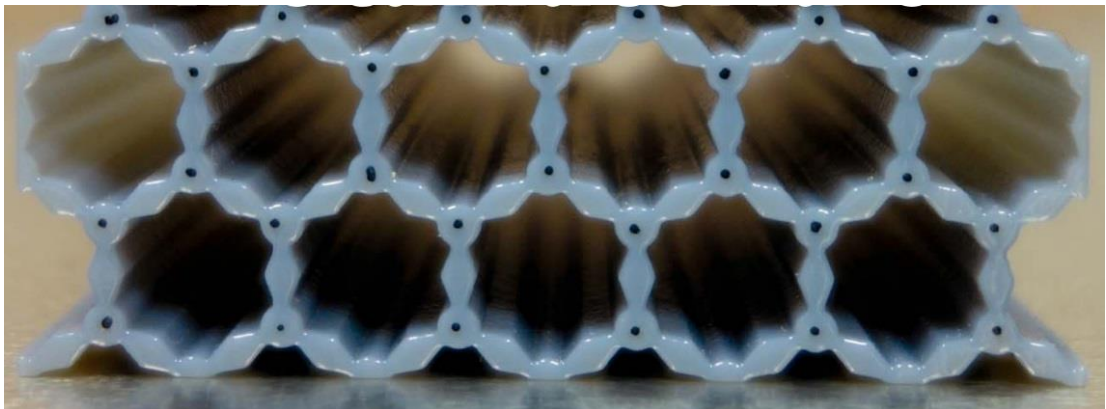


**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Науково-дослідний інститут електроніки та мікросистемної техніки**

Кузьмичев А.І., Татарчук Д.Д., Богдан О.В.

Акустичні метаматеріали



Київ 2025

УДК 539.3
А44

А44 **Акустичні метаматеріали** / А. І. Кузьмичев, Д.Д. Татарчук, О.В. Богдан.
— Київ, Аверс, 2025. — 21 с. : 5 іл..
ISBN 978-966-8777-06-6

Наведено аналіз досліджень, які проводяться в галузі акустичних метаматеріалів, історичний огляд як метаматеріалів, так і способів виробництва, а також прогнози щодо майбутніх напрямків досліджень. Розглянуті структурні варіанти реалізації та технологічні особливості. Робота виконана на основі огляду науково-технічної інформації та адаптованого перекладу.

Призначено для студентів, аспірантів, молодих спеціалістів та науково-технічних робітників, зокрема, спеціальностей G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» (153 «Мікро- та наносистемна техніка» та 171 «Електроніка»).

УДК 539.3

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою Науково-дослідного інституту електроніки та мікросистемної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», протокол № 10 від 18 листопада 2025 року

Подяки:

Виконано при грантовій підтримці Національного фонду досліджень України, реєстраційний номер №2023.04/0047 «Розроблення мобільного пасивного акустичного пеленгатора на основі широкосмугових інфразвукових сенсорів».

© А. І.Кузьмичев, Д.Д. Татарчук,
О.В.Богдан, 2025

ISBN 978-966-8777-06-6

Зміст

Вступ.....	4
1.Метаматеріали і композити.....	5
2.Негативна маса і жорсткість	6
3.Динамічна мікроструктура.....	8
4.Початок 21-го століття.....	10
5.Трансформаційна акустика	15
6.Використання технологій.....	16
Висновок	19
Література	20

Вступ

Механічні коливання, що розповсюджуються в речовині (матерії) у вигляді механічних хвиль, зазвичай сприймається як звук. Людина не тільки здатна сприймати звук, вона може генерувати звукові сигнали для мовного та інших форм спілкування, керувати звуковими сигналами, створювати музику, а також виявляти небезпеку, здійснювати неруйнівний контроль предметів у промисловості та людських органів у медицині. Сукупність фізичних явищ, пов'язаних з механічними хвилями, та їх застосування у приладах та технологіях відносять до галузі акустики.

Матеріальна основа існування звуку призводить до виділення такої галузі знань як акустичні матеріали. Зрозуміло, що для різних акустичних застосувань потрібні різні матеріали, і пошук нових акустичних матеріалів не припиняється. Виник новий науково-технологічний напрямок - створення так званих акустичних метаматеріалів, які мають властивості, які недоступні звичайним природним матеріалам. Тобто мета виготовлення акустичних метаматеріалів полягає в створенні матеріалів, які перевищують поведінку природних матеріалів.

Дослідники у сфері акустичних метаматеріалів прагнуть досягти надзвичайних акустичних характеристик з ретельно підібраним розташуванням звичайних акустичних елементів. Фактично, багато акустичних метаматеріалів використовують акустичні резонатори, схожі на ті, що знаходяться в трубному органі і відомих як резонатор Гельмгольца. Ці нові властивості матеріалу можуть потім використовуватися для контролю над поширенням акустичних хвиль безпрецедентними способами. Етимологія слова «*metamaterial*» відображає цю мету: *мета* - це грецький префікс, що означає *понад* (англ. – *beyond*).

У цьому препринті будуть розглянуті основні атрибути акустичних метаматеріалів та те, що робить акустичні метаматеріали незвичайними. Сподіваємось надати деяке уявлення про поточний та майбутній потенціал цих захоплюючих структур. Також будемо обговорювати метаматеріали, призначені для взаємодії з електромагнітними або пружними хвилями, хоча ми не будемо детально розглядати їх.

1. Мета матеріали і композити

Появі акустичних та пружних метаматеріалів передувало значне вивчення у суміжних галузях композиційних матеріалів.

Дійсно, композитні матеріали зробили революцію в наших уявленнях про те, що можна досягти звичайними матеріалами, і тепер є найважливішими складовими сучасної промислової продукції різного призначення, насамперед аерокосмічного та автомобільного. Розглянемо, наприклад, фіберглас, що складається із дрібних скляних волокон, вбудованих в епоксидну матрицю. Як характерно для композитів, фіберглас має механічні властивості, що є сумішшю з двох вихідних матеріалів. Результатом є матеріал, властивість якого краща, ніж властивості будь-якого компонента: легкий матеріал, здатний наближатися до жорсткості скляних волокон, а толерантність до пошкоджень, що наближається до властивостей епоксидної смоли.

На жаль, матеріальні властивості традиційних композитів змушені лежати десь між властивостями їх компонентів. Не можна було очікувати, що міцність фібергласу перевищуватиме температуру або скляних волокон, або епоксидної матриці. Це інтуїтивно зрозуміле обмеження було широко вивчене та ретельно оформлене; верхня та нижня межі ефективних властивостей композиту були добре сформовані для певних комбінацій матеріалів з широким спектром мікроструктур [1]. За останні роки дізналися, що точний контроль над мікроструктурами може створювати матеріали з надзвичайними комбінаціями жорсткості та щільності (див. [2] та PhT, Jan. 2012, p. 13) та еластичні плащі, які могли б приховати горох навіть для найвибагливіших казкових принцес [3]. Незважаючи на їхні чудові властивості, такі матеріали не порушують відомих обмежень на ефективні пружні властивості.

На відміну від традиційних композитів, акустичні метаматеріали можуть перевищувати відомі межі властивостей звичайних матеріалів. Це досягається шляхом використання субхвильової мікроструктури, яка була виготовлена зі звичайних матеріалів та вбудована у фонове середовище. (Для повітряних або водних акустичних хвиль, фонове середовище – це просто навколишня середовище). Акустичні метаматеріали можна використовувати

для отримання ефектів, подібних до тих, що отримуються з традиційними композитами, але їхні нові властивості також можуть дозволити їм маніпулювати полями акустичних хвиль способами, яких неможливо досягти з природними матеріалами або традиційними композитними матеріалами.

2. Негативна маса і жорсткість

Матеріальні властивості, що представляють інтерес для акустичні метаматеріалів, є ефективна масова густина ρ та ефективний модуль об'ємної пружності κ , що аналогічно жорсткості пружини. На рис. 1 показано області простору параметрів, що підходять для звичайних матеріалів, таких як полімери, метали та кераміка. Звичайно, всі ці матеріали лежать у верхньому правому квадранті графіка ρ – κ . Простір параметрів, зайнятий акустичними метаматеріалами, виходить далеко за межі області, зайнятої звичайними матеріалами, і навіть включає області, в яких одна або обидві ефективні властивості матеріалу дорівнюють нулю або є негативними.

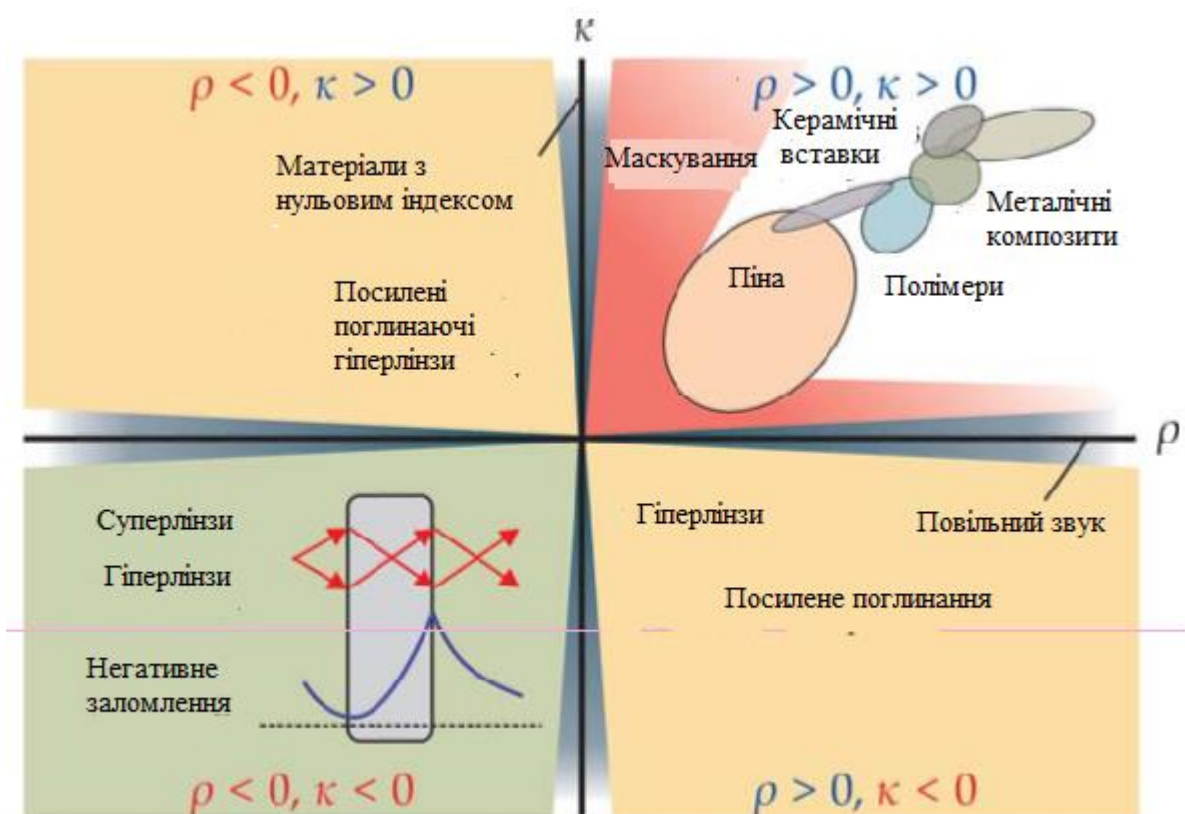


Рис. 1 (адаптовано). Розширений діапазон значень масової густини ρ і модуля об'ємного матеріалу (жорсткості) κ можна отримати за допомогою акустичних метаматеріалів. Верхній правий квадрант, для якого ρ та κ є позитивними, є областю традиційних матеріалів та метаматеріалів пристрої

для маскувння (укриваючого плаща невидимки). Решта три квадранти та їхні межі відповідають лише метаматеріалам, деякі з яких показані. Матеріали з нульовим індексом преломлення та матеріали з повільним звуком, відповідно, мають значення ρ та k , що зникають. Нижній лівий квадрант ілюструє деякі властивості суперлінз та гіперлінз, обидві з яких, як описано в тексті, долають дифракційну межу. Вигин акустичних променів цими лінзами визначається негативним показником заломлення, що призводить до одночасного фокусування хвиль, що поширюються (червоні стрілки) та збільшення хвиль, що зникають (синя крива), що разом зменшують ефекти дифракції.

Особливий інтерес для акустичних застосувань представляє здатність маніпулювати швидкістю акустичної хвилі. Оскільки акустичні метаматеріали мають широкий спектр ефективних властивостей, вони можуть створювати хвилі, що поширюються, з надзвичайно високими, нульовими або навіть негативними швидкостями, не кажучи вже про чисто уявні значення, які відповідають непоширеним еванесцентним хвилям. Негативна фазова швидкість — зворотно поширюючийся фазовий фронт — вимагає, щоб як ефективна масова густина, так і модуль об'ємної пружності були негативними. Матеріал з такою комбінацією властивостей називають подвійно негативним або лівостороннім. Матеріали з негативною масовою густиною та позитивним модулем об'ємної пружності або з позитивною масовою густиною та негативним модулем об'ємної пружності називаються одинично негативними. Таки матеріали з негативною густиною не можуть підтримувати хвилі, що поширюються, тому будь-яка акустична хвиля в цих матеріалах експоненціально затухатиме. Це робить їх чудовими звукопоглиначами.

Розширений діапазон параметрів акустичних матеріалів та фазових швидкостей надихнув на концепції та застосування, які привернули увагу як наукової спільноти, так і широкої громадськості [4,5]. Деякі з цих застосувань та пов'язані з ними режими параметрів показано на рисунку 1. Акустичні плащі, наприклад, загинають акустичні хвилі навколо своєї внутрішньої частини і приховують будь-який об'єкт усередині від падаючого акустичного поля. Вони не потребують одно- або двократно негативних матеріалів, але деякі типи плащів вимагають надзвичайно великих, анізотропних параметрів, які лежать поза діапазоном звичайних матеріалів [6]. Таким чином, властивості, необхідні для акустичного маскувння (укривання), досягаються лише завдяки належним чином розробленому акустичному метаматеріалу. Явища, розроблені за надзвичайно низьких

матеріальних властивостей, включають повільний звук і речовини з нульовим показником заломлення.

Подвійно-негативні акустичні метаматеріали дозволяють суттєво покращити рефракційні властивості через негативне заломлення. Вони дозволяють нам побудувати компоненти, які посилюють вимираючі (еванесцентні) хвилі та забезпечують роздільну субхвильову здатність підсилювача для акустичних зображень. З подвійно-негативних матеріалів можна також виготовляти й гіперлінзи, які використовують гіперболічну дисперсію відношення між частотою та хвильовим числом, а не еліптичну дисперсію, знайдену в традиційних анізотропних матеріалах, для отримання негативної групової швидкості та негативного показника заломлення.

Гіперлінзи забезпечують різний спосіб поліпшення роздільної здатності акустичних зображень. Вони також можуть бути побудовані з одного негативних анізотропних акустичних метаматеріалів, але ці гіперлінзи не мають певних переваг, пов'язаних з негативною рефракцією.

3. Динамічна мікроструктура

Що дозволяє акустичним метаматеріалам володіти властивостями, які перевищують межі традиційних матеріалів? Ключ полягає в мікроструктурі метаматеріалу, зокрема в його прихованих ступенях свободи, яка не може бути безпосередньо виявлена зовнішнім спостерігачем [7]. Ці приховані ступені свободи реалізуються шляхом ретельного розташування динамічних мікроструктурних елементів. Найпростішими та найбільш широко використовуваними є малі, резонансні елементи (часто званих включеннями), такі як резонатори Гельмгольца, резонансні розсіювачі та пружні мембрани. Навіть якщо кожен окремих елемент невеликий, внесок багатьох елементів призводить до великого чистого ефекту, що нагадує те, як непримітно звучачі окремі труби органу створюють величкий звук при правильному звучанні разом. Зокрема, повторювана структура призводить до вираженої загальної реакції, навіть коли кожен окремих елемент мікроструктури крихітний порівняно з довжиною хвилі у фоновому середовищі.

Крім того, на деяких частотах відгук динамічних включень може бути великим і не синхронізованим з падаючою акустичною хвилею. У такому випадку прийнятною інтерпретацією загального відгуку акустичного метаматеріалу є те, що фонове середовище містить однорідні включення, ефективні властивості матеріалу яких є негативними. Отримані ефективні

властивості для метаматеріалу обов'язково залежать від частоти і часто помітно відрізняються від статичних властивостей метаматеріалу.

На рис. 2 показано поняття прихованих ступенів свободи за допомогою простих репрезентативних механічних систем, що містять маси та пружини [8]. Ці системи підкреслюють, як наявність та розташування прихованих ступенів свободи можуть створювати розширений простір матеріальних параметрів рис. 1. Як показано на рис. 2а, різні розташування зв'язаних мас та пружин діють як єдині ефективні елементи маси та пружини (пружності), причому маса зміщується на відстань $x(t)$ під дією прикладеної сили, що залежить від часу $F(t)$. Перегрупувавши другий закон Ньютона та закон Гука, можна отримати ефективну масу та коефіцієнт пружності системи: $m_{\text{eff}} = F(t)/\ddot{x}(t)$ та $k_{\text{eff}} = F(t)/x(t)$, де подвійні крапки позначають другу похідну для x відносно часу.

Щоб зрозуміти, як негативні ефективні властивості від динамічного руху звичайних мас і джерел виникають, розглянемо частотні реакції, наведені у рис. 2е, 2f. У квазістатичних умовах (тобто, частота збудження значно нижча за будь-яку резонансну частоту системи), результуюча ефективна маса та жорсткість пружини відповідають відомим позитивним значенням, які можна отримати для мас та пружин, з'єднаних послідовно. Зі збільшенням частоти збудження та наближенням до резонансу система відхиляється від своєї звичної поведінки. Така реакція може відповідати різкій зміні величини ефективної маси або жорсткості пружини.

Коли частота проходить через резонанс, фаза руху ефективної маси відносно фази прикладеної сили може зміститися на 180° . В результаті вектор прикладеної сили змінює свою орієнтацію відносно прискорення або зміщення складеного об'єкта. Еквівалентна система, яка показана на рис. 2е, замінює складений об'єкт ефективною масою, яка є негативною в деякому діапазоні частот. Аналогічно, система, яка показана на рис. 2f, замінює складений об'єкт пружиною, чия ефектність іноді є негативною. Незважаючи на те, що прості системи «маса-пружина», наведені у розділі 2, можуть здаватися тривіальними, їх фундаментальна поведінка є основою багатьох акустичних метаматеріальних мікроструктур. Справжня проблема, яка пов'язана з акустичними метаматеріалами, полягала в тому, щоб перекласти фізичні принципи, такі як ті, що проілюстровані на рисунку, в реалізовані мікроструктури акустичних метаматеріалів.

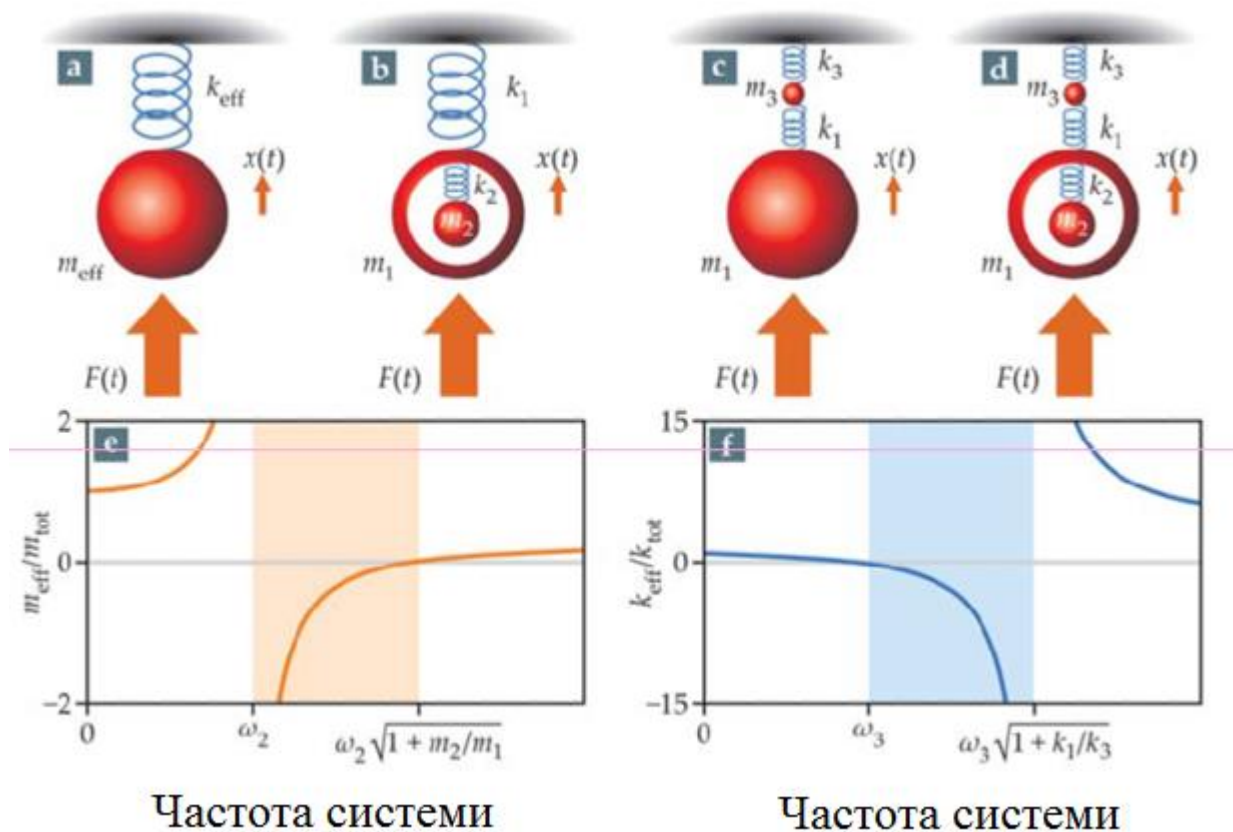


Рис. 2 (адаптовано). Системи з масами та пружинами ілюструють ідею прихованих ступенів свободи в акустичному метаматеріалі.

(а) Різні розташування мас (m_i) та констант пружини (k_i) на панелях **b–d** поєднуються, щоб дати ефективні константи маси та пружини, що описують зміщення кожної системи $x(t)$ у відповідь на рухову силу $F(t)$, як це зображено тут. Ми припускаємо, що m_3 набагато легше, ніж дві інші маси.

Окремі зміни комбінації мас та пружин дозволяють мати:

- (b) – негативну масу,
- (c) – негативну жорсткість пружини, та
- (d) – негативні масу та жорсткість.

(e, f) Нормалізовані ефективна маса та жорсткість пружини показані як функції частоти збудження. Резонансні частоти ω_2 та ω_3 становлять відповідно $(k_2/m_2)^{1/2}$ та $(k_3/m_3)^{1/2}$. На панелі **e**, яка відповідає конфігурації маса-пружина на панелі **b**, помаранчева смуга показує область негативної динамічної маси. На панелі **f**, яка відповідає конфігурації маса-пружина на панелі **c**, синя смуга показує область негативної жорсткості. Нормалізація визначається квазістатичною масою $m_{\text{tot}} = m_1 + m_2$ і квазістатичною постійною (жорсткістю) пружини $k_{\text{tot}} = (1/k_1 + 1/k_3)^{-1}$.

4. Зародження галузі метаматеріалів у 21-му столітті

Підґрунтям для розвитку акустичного метаматеріалу, було положено роботою з композитними еластичними матеріалами, але походження

акустичних метаматеріалів насправді має більш безпосереднє відношення до поля електромагнетизму. (Див. J.Pendry and D. Smith, PhT, June 2004, page 37, а також книгу Вольпян О.Д., Кузьмичев А.І. Негативне заломлення хвиль. Введення у фізику та технологію електромагнітних метаматеріалів. – Київ: Аверс, 2012.). Розвиток електромагнетизму на рубежі 21-го століття надихнув вчених шукати ідеї - маскуванню, негативне заломлення, надсвітіння тощо. Хоча такі ідеї існують вже багато років, їх реалізація можлива лише з метаматеріалами. Електромагнітним елементом у полі електромагнетизму був спіральний кільцевий резонатор, який вперше був запропонований John Pendry та його колегами у 1999 році та експериментально продемонстрував David Smith та компанія наступного року [9].

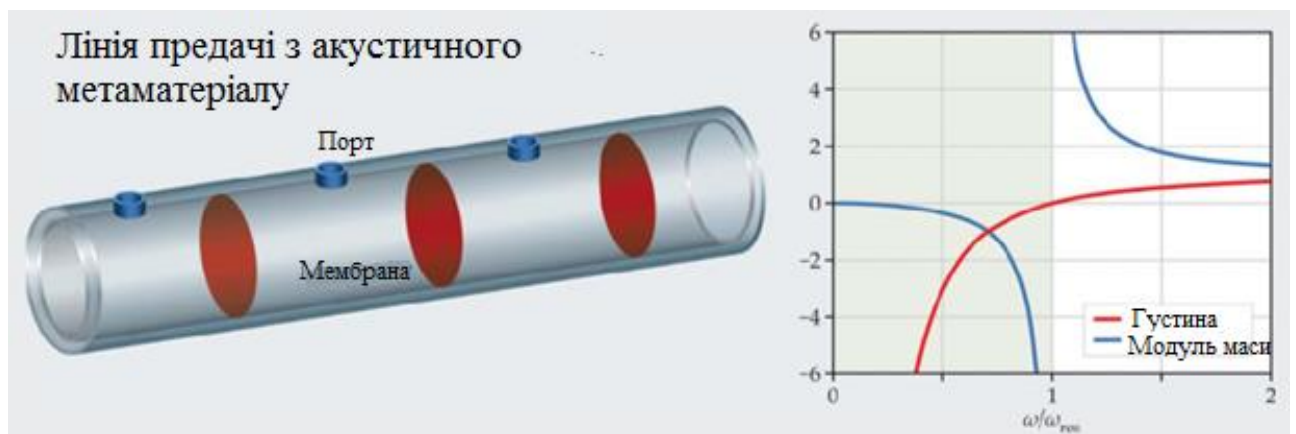
Водночас дослідники використовували фононні та звукові кристали (приклад показано на рис. 3а) для вивчення поведінки смуги пропускання та ширини забороненої зони, пов'язаної з пружними та акустичними хвилями, що поширюються в періодичних середовищах. Ці зусилля базувалися на великій роботі в суміжній галузі фотонних кристалів. Метою досліджень фононіки часто є використання зонної структури фононних кристалів для досягнення таких надзвичайних результатів, як спрямування хвиль заданими шляхами в тривимірному просторі, частотна фільтрація та фокусування або уповільнення хвиль, що поширюються через кристал [10]. На відміну від фононних кристалів, які отримують свої унікальні властивості від взаємної взаємодії елементів, розмір та відстань між якими порядку одної довжини хвилі, акустичні метаматеріали покладаються на субхвильову структуру — як у геометрії окремих елементів, так і на відстані між ними — та самовзаємодію для створення нових моделей поведінки. Акустичні метаматеріали не потребують періодичної мікроструктури для досягнення своїх надзвичайних властивостей, хоча ефекти періодичності часто використовуються та можуть призвести до простішого математичного аналізу.

У 2000 р. Zhengyou Liu а і його колеги виявили негативні ефектні властивості в тому, що зараз визнано першим експериментально продемонстрованим акустичним метаматеріалом: звуковим кристалом, побудованим з локально-резонансних елементів, розходження яких набагато менше, ніж відповідна акустична довжина хвилі [11]. Звукокристалічні включення, що використовуються Liu та його колегами, використовують ті ж прості фізичні механізми, що й масово-пружинні резонатори, проілюстровані на рис. 2. Їхнє звуково-кристалічне втілення замінює маси концентричними, щільними,

майже жорсткими сферичними оболонками, а пружини – високоподатливими шарами.

Акустичні хвилеводи забезпечили ще один надійний засіб реалізації акустичних метаматеріалів. Задовго до існування акустичних метаматеріалів акустичні хвилеводи використовувалися для демонстрації екстремальних або екзотичних ефектів. У найпростішому вигляді акустичний хвилевід може бути створений з трубки з жорсткими стінками. Одним із прикладів є акустичний глушник, який використовувався поколіннями для придушення небажаного звуку, що поширюється в повітроводах і трубах. Фактично, деякі з найперших демонстрацій акустичних хвиль Блоха (хвиль у періодичних середовищах) та їхньої зонної структури були досягнуті за допомогою акустичних хвилеводів з періодичним розташуванням бічних резонаторів [12]. Коли стінки хвилеводу не є жорсткими, існує гранична частота, нижче якої акустичні хвилі є еванесцентними та не можуть поширюватися. Акустичні хвилі також еванесцентні в смузі затримки (забороненій зоні) періодичної структури, такої як хвилевід з рівновіддаленими мембранами вздовж його довжини; для деяких частот періодичний хвилевід є однонегативним метаматеріалом.

Крім того, періодичне розташування акустичних елементів у довгому акустичному хвилеводі є акустичним еквівалентом електромагнітної лінії електропередачі. Ця аналогія дозволила використати конструкції електромагнітних метаматеріалів для побудови акустичних метаматеріалів з трансмісійних ліній. Дослідження з акустичними хвилеводами призвело до реалізації акустичних метаматеріалів, що відображають однонегативні або подвійні негативні властивості у широкому діапазоні частот [13]. У на вставці 1 детально розглянута представлена подвійна негативна акустична лінія передачі.



Вставка 1 (адаптовано).

Еластичні мембрани та порти або бічні отвори в акустичному хвилеводі можуть діяти як індуктивні та ємнісні компоненти в електромагнітній лінії передачі. Виходячи з цього принципу, Sam Hyeon Lee та його колеги виготовили подвійний негативний акустичний метаматеріал для лінії передачі шляхом періодичного встановлення мембран та портів у спосіб, аналогічний показаному вище [13].

Неінтуїтивно зрозуміло, негативні ефективні густина маси ρ_{eff} та модуль об'ємної пружності κ_{eff} виникають через динамічну мікроструктуру. Як показує графік нормалізованих параметрів, ефективні властивості акустичних метаматеріалів залежать від частоти; бажана реакція відбувається в межах певної смуги частот.

Негативну ефективну густину нижче резонансу можна досягти шляхом розміщення поперечних пружних мембран у хвилеводі. За такої конфігурації ефективна частотно-залежна густина має форму $\rho_{\text{eff}} = \rho[1 - (\omega_{\text{res}}/\omega)^2]$, де ω_{res} – резонансна частота.

Поперечні еластичні мембрани, як правило, вважають елементами жорсткості: як батут, вони забезпечують відновну силу, пропорційну зміщенню. Але в акустичному метаматеріалі трансмісійної лінії мембрана функціонує як частотно-залежний елемент маси на частотах, що знаходяться нижче за згибний резонанс ω_{res} мембрани. Ця неінтуїтивна характеристика є наслідком прискорення, наданого мембрані силою падаючої акустичної хвилі, це описується ньютонівським співвідношенням $m_{\text{eff}} = F/a$. Негативна ефективна маса виникає, коли результуюча сила, яка зумовлена взаємодією зі звуковою хвилею, не у фазі з прискоренням.

З іншого боку, паралельне розташування акустичних портів у хвилеводі може бути використане для досягнення негативної ефективної жорсткості нижче резонансу; така конфігурація призводить до ефективного модуля об'ємної пружності $\kappa_{\text{eff}} = \kappa[1 - (\omega_{\text{res}}/\omega)^2]^{-1}$.

Коротше кажучи, в акустичній метаматеріальній лінії передачі, елементи передачі це – акустичні порти, які

виробляють негативну жорсткість, і мембрани, які виробляють негативну густину маси. Для простоти подання ми припустили, що частоти резонансу для щільності та жорсткості рівні. Загалом, і для пристрою, розробленого Liu і, зокрема, колегами, частоти різні. Внаслідок цього поєднання звичайних елементів у акустичній лінії передачі може призвести до надзвичайних одно- і двонегативних ефективних акустичних властивостей.

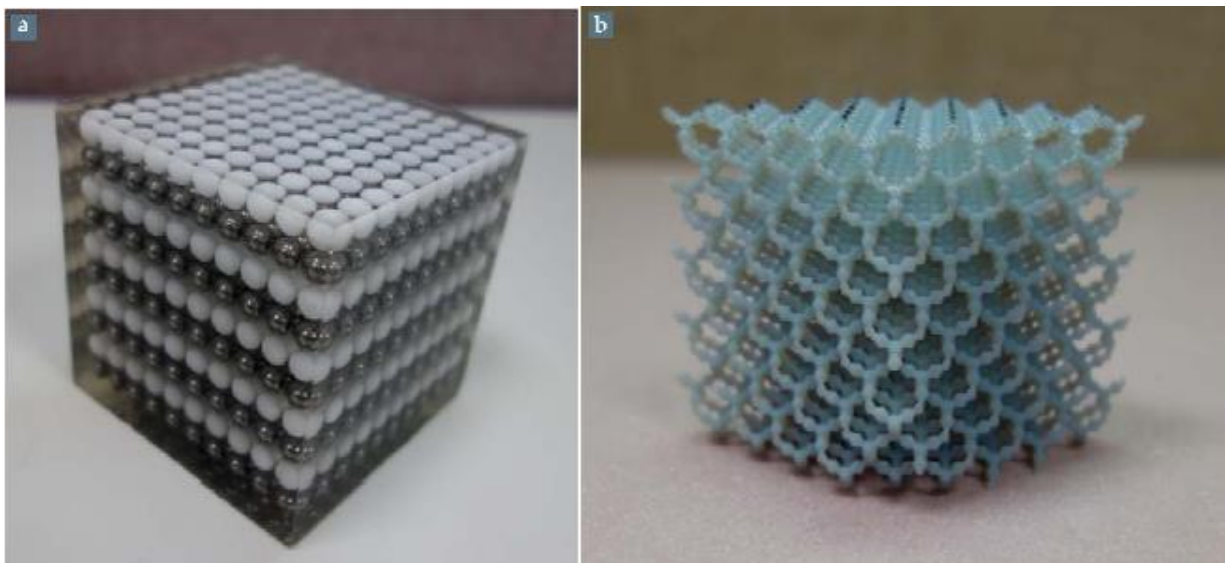


Рис. 3 (адаптовано). Реальні акустичні метаматеріали виглядають так:

(а) Звукові кристали є акустичними аналогами фотонних кристалів: в обох випадках періодичні решітки розсіювачів можуть створювати екстремальні зміни в характеристиках поширення хвиль на певних частотах. Звуки певних частот і напрямків не можуть поширюватися через них. У цій структурі періодичне розташування пружних сфер вбудовано в полімерну матрицю.

(б) Пентамодні матеріали, які підтримують напруження лише в одному з шести можливих режимів, надихнули багато конструкцій акустичних метаматеріалів. Тут зображено приклад із тривимірною структурою. Зображення на стор. 1 показує аналогічний матеріал зі структурою лише у двох вимірах (фотографії M. Nicholas).

5. Трансформаційна акустика

Експериментальні демонстрації надзвичайної поведінки звукових кристалів і хвилеводів показали, що акустичні метаматеріали можна реалізувати, але це було явно не зв'язано з математичною концепцією — перетворенням координат — і викликало інтенсивний інтерес до метаматеріалів і стимулювала в першому десятиріччі значну частину досліджень у цій галузі. У контексті акустичних хвиль пов'язаний з цим метод виведення властивостей метаматеріалів відомий як трансформаційна акустика. Однозначне відображення (картинка "один на один") з'єднує цільовий простір, що демонструє цікаву акустичну поведінку, наприклад, маршрутизацію (переміщення) акустичних хвиль навколо замкнутого об'єкта для захисту його від зайвих вух, з фізичним простором зі звичайними матеріалами та звичайним акустичним полем. Потім карта використовується для визначення властивостей матеріалу в цільовому просторі, що створює бажаний ефект. Трансформаційна акустика – це елегантний та неординарний метод. Властивості матеріалу, який він визначає, також є незвичайними і на практиці потребують метаматеріалів для їх реалізації. Перш ніж перетворення координат були застосовані до маніпуляції з акустичними хвилями, їх застосовували до електромагнітних хвиль (див. PhT, Feb. 2007, p. 19). Дійсно, концепція трансформаційної акустики була натхненна прямою аналогією, яка існує у двох вимірах між рівняннями Максвелла та рівняннями, що описують поширення акустичних хвиль [6]. Незначні відмінності між електромагнітними та акустичними перетвореннями координат виникають у трьох вимірах, оскільки тривимірні електромагнітні хвилі є поперечними, а акустичні хвилі – поздовжніми [14]. В обох випадках перетворення координат зазвичай вимагають високо анізотропних матеріалів. В електромагнітному контексті такі матеріали теоретично можна реалізувати з чергуванням шаруватих структур (*with alternating layered structures*), кожна з яких має ізотропні властивості. Однак для пружних матеріалів, в яких співіснують стискальні та поперечні зсувні хвилі, перетворення координат вимагають набагато більш екзотичних речовин — пентамодових матеріалів — з принципово новим типом мікроструктури. Пентамодові матеріали характеризуються тензорами жорсткості, які мають лише одне ненульове власне значення з шести можливих [15]. Цей опис є математичним способом стверджувати, що пентамодові матеріали можуть підтримувати лише одне напруження; отже, п'ять мод деформації не зберігають енергію в матеріалі. На рис. 3b показано пентамодовий метаматеріал, створений за допомогою адитивного виробництва.

6. Використання технологій

Дослідники з Університету штату Північна Кароліна і Університету Дьюка (США) розробили метаматеріал з паперу та алюмінію, який управляє звуковими хвилями (див. рис. 4). Новий метаматеріал здатний збільшувати роздільну здатність акустичного зображення, фокусувати акустичні хвилі і контролювати кути, під якими поширяється звук. Пристрої акустичної візуалізації, в яких може використовуватися розробка вчених Північної Кароліни, застосовуються як в медичній діагностиці, так і в тестуванні структурної цілісності різних конструкцій, від літаків до мостів.

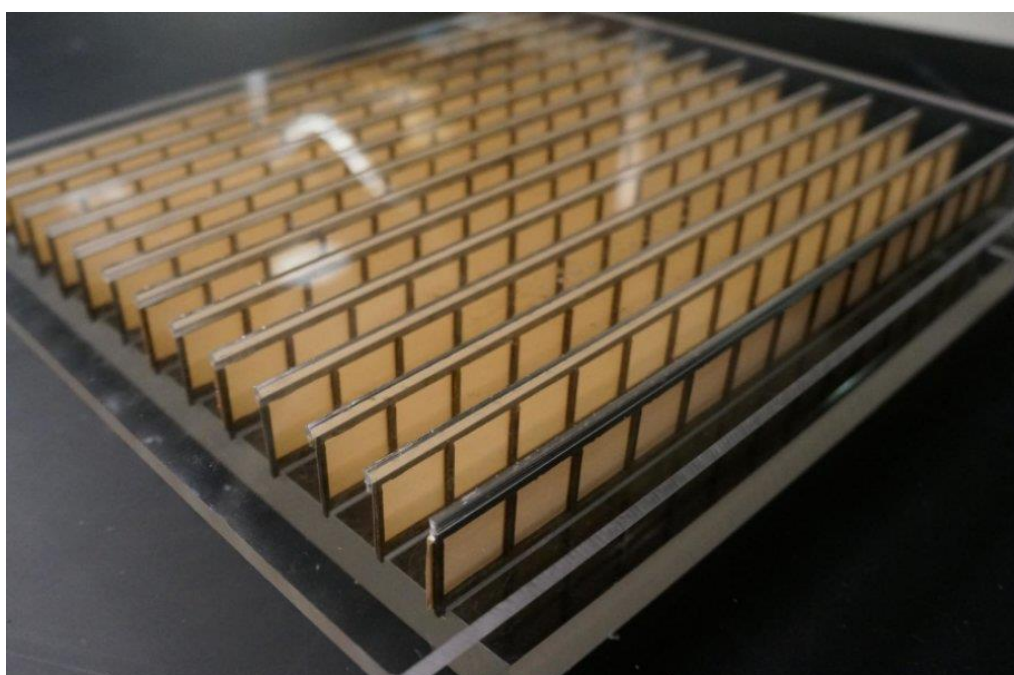


Рис. 4 (адаптовано). Реальна конструкція акустичних метаматеріалів Університету штату Північна Кароліна і Університету Дьюка (США)

«Ми знали, що щось схоже на цей метаматеріал теоретично можливий, але насправді ніхто не створював його раніше», – повідомив професор Yun Jing, один із співавторів роботи.

Як повідомляє прес-реліз Університету штату Північна Кароліна, структурний дизайн розробленого матеріалу дозволяє класифікувати його як «гіперболічний» метаматеріал. Це означає, що він взаємодіє з акустичними хвилями двома різними способами. В одному напрямку метаматеріал демонструє позитивну щільність (аналогічно позитивній коефіцієнту заломлення) і взаємодіє з акустичними хвилями звичайним чином - так само,

як повітря. Однак в перпендикулярному напрямку він в аспекті взаємодії зі звуком демонструє негативну щільність. Це змушує акустичні хвилі відхилятися під кутами, які протилежні передбачуваним базової фізикою.

В результаті метаматеріал має кілька корисних додатків.

Перш за все, його можна використовувати для поліпшення акустичної візуалізації. У класичних умовах деталізація не може бути менше, ніж половина довжини хвилі звуку. Наприклад, хвиля частотою 100 кГц, що розповсюджується в повітрі, має довжину 3,4 мм і не здатна забезпечити дозвіл краще, ніж 1,7 мм.

«Але наш метаматеріал покращує ситуацію, – сказав Chen Shen, аспірант університету штату Північна Кароліна і провідний автор роботи. – Розміщуючи його між пристроєм візуалізації і об'єктом, який зображується, ми здатні більш ніж удвічі поліпшити дозвіл акустичної візуалізації: з початкової половини довжини хвилі до трохи більше ніж одну п'яту».

Метаматеріал також може фокусувати акустичні хвилі. «Медики і інженери-проектувальники будівельних конструкцій іноді потребують фокусування звуку для візуалізації об'єктів або для терапевтичних завдань, – каже проф. Yun Jing, – Наш метаматеріал дозволяє реалізувати це, а також здатний поліпшити роздільну здатність в даних матеріалах. Існує небагато інструментів, здатних і на те, і на інше».

Нарешті, цей метаматеріал дає розробникам більше контролю над кутами, під якими акустичні хвилі можуть проходити крізь нього (див. рис. 5). Шень подає такий приклад: «Метаматеріал здатний блокувати звук з більшості напрямів, залишаючи лише невеликий просторовий діапазон, що може бути корисно для мікрофонів».

На даний момент прототип має площу приблизно 30 см² і ефективний для звуку частотою від 1 до 2,5 кГц. Автори ставлять перед собою завдання зробити зразки меншого розміру, які працювали б з більш високочастотним звуком.

Метаматеріали отримують черговий бал в свою скарбничку в рейтингу корисності свого використання. Дослідники в Університеті штату Північна Кароліна спроектували позитивні метаматеріали, які допоможуть медичним фахівцям і інженерам в діагностуванні проблем, які перебувають глибоко під шкірою в шарах кісткової і м'язової тканин. Ці мета-матеріали структуровані, щоб складати так звані «аберуючі шари», які блокують або спотворюють ті акустичні хвилі, які використовуються в ультразвуковому дослідженні, дозволяючи тепер провести ультразвук крізь голову пацієнта або крило літака для вивчення і діагностики.

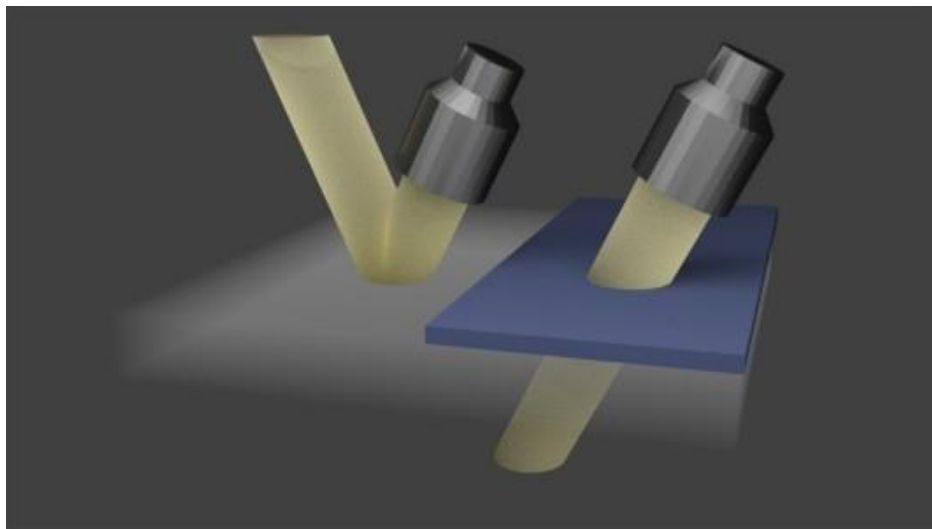


Рис. 5 (адаптовано). Контроль над кутами, під якими акустичні хвилі можуть проходити крізь акустичний метаматеріал

Відображення картини спочатку включає в себе випускання високочастотних акустичних хвиль, які можуть бути переведені на зображення досліджуваного об'єкта. Ця картинка формується на підставі часу відгуків від різних ділянок. Це великий прорив в таких напрямках, як для дослідження матки вагітної жінки або перегляду внутрішньої структури твердих об'єктів десь а дні океану (в останньому випадку частіше поки що користуються гідролокатором), але певні матеріали, що знаходяться між сканером і цільовою областю - такі як кістка і метал - часто блокують або спотворюють значну частину сигналу. Вони відомі як аберуючі шари.

Те, що змогли створити дослідники, схоже акустичному плащу. Додаткові метаматеріали представляють собою сукупність мембран і маленьких труб, які розподілені в різних напрямках і мають різні товщини. Це відшкодовує акустичні властивості аберуючих шарів, ефективно врівноважуючи їх.

Технологія вже пройшла тести з використанням комп'ютерних методів моделювання. З метаматеріальною структурою 88 відсотків енергії хвилі ультразвуку змогли дати більш чітку картинку досліджуваного об'єкта, тоді як без «плаща» ця позначка сягала максимум 28%.

Висновок

Історія наповнена прикладами нових технологій, що сприяють науковому прогресу. Відомі випадки включають друкарський верстат, як прискорив комунікацію та забезпечив сталість наукових концепцій; мікроскопи, які дозволили нам вивчати біологічні клітини; телескопи, які ми спрямували до небес; та техніка рентгенівської дифракції, яка дозволила відкрити структуру ДНК. Важливо, що такі технологічні досягнення не лише допомагають вченим підтвердити гіпотези та відкрити ключові концепції, але й непомітно впливають на те, як ми формулюємо питання про світ і Всесвіт. Наприклад, більш конкретна картина структури ДНК дозволила вченим висувати гіпотези про генетичне кодування, які неможливо було уявити до знань, досягнутих за допомогою рентгенівської дифракції.

Прогрес у розробці акустичних, пружних та електромагнітних метаматеріалів є результатом поєднання технологічних досягнень, досягнутих за останні 20–30 років. Справді, галузь акустичних метаматеріалів є прототипним прикладом нових концепції у фізиці, що поєднуються з досягненнями в області технології, які головним чином пов'язані з захопливою галуззю адитивного виробництва та широким доступом до потужних обчислювальних засобів (див. M. Wegener and S. Linden, PhT, Oct. 2010, p. 32, and Sept. 2015, p. 26). Ці та інші технології дозволяють дослідникам швидко моделювати, створювати та тестувати складні структури для маніпулювання акустичними хвилями, що впливають із суворих математичних прогнозів, таких як прогнози трансформаційної акустики.

За останні роки галузь акустичних метаматеріалів виросла з молоді дисципліни на перетині акустики, фононіки та композитних матеріалів у спеціалізовану та процвітаючу галузь на передовій науки та техніки. Дослідники успішно розробили конструкції, що підтверджують концепцію, та експериментально продемонстрували широкий спектр надзвичайно ефективних акустичних властивостей. Однак, для повного розкриття потенціалу акустичних метаматеріалів необхідно подолати значні технічні труднощі. Зрештою, проектування та виготовлення динамічної

мікроструктури, адаптованої для створення бажаної ефективної реакції матеріалу, вимагає великої точності та уваги до структурних деталей, потенційно змінних на довжині на порядки величини.

Очевидним є оптимізм щодо розвитку акустичних матеріалів. Поєднання адитивного виробництва, передових обчислень та нових ідей, які вони допомагають генерувати, має значні перспективи для подальшого розвитку в дослідженнях акустичних метаматеріалів. Завдяки цим інструментам вчені, які раніше працювали в галузі фононних матеріалів, композитних матеріалів, математики, електромагнітики та фізики твердого тіла, швидко змінюють можливості маніпулювання акустичними та пружними хвилями.

Література

Були прореферовані статті з журналів AcT та PhT за 2010-2025 роки (див. посилання, зазначені у тексті роботи), у тому числі

M. R. Haberman, A. N. Norris. Acoustic metamaterials. – AcT, 12(3), 31 (2016),

M. R. Haberman, M. D. Guild. Acoustic metamaterials. – PhT, 69(6), 42 (2016), а також

О. Д. Вольпян, А. І. Кузьмичев. Негативне заломлення хвиль. Введення у фізику та технологію електромагнітних метаматеріалів. – Київ: Аверс, 2012

і такі літературні джерела:

1. R. M. Christensen, Mechanics of Composite Materials, Dover (2005), chap. 4.
2. T. A. Schaedler et al., Science 334, 962 (2011).
3. T. Bückmann et al., Nat. Commun. 5, 4130 (2014).
4. G. Ma, P. Sheng, Sci. Adv. 2, e1501595 (2016).
5. S. A. Cummer, J. Christensen, A. Alù, Nat. Rev. Mater. 1, 16001 (2016).
6. S. A. Cummer, D. Schurig, New J. Phys. 9, 45 (2007).
7. G. W. Milton, J. R. Willis, Proc. R. Soc. A 463, 855 (2007).
8. See also X. Zhou et al., in Handbook of Micromechanics and Nano - mechanics, S. Li, X.-L. Gao, eds., CRC Press (2013), chap. 2.
9. D. R. Smith et al., Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).
10. J. Sanchez-Dehesa, A. Krokhin, in Phononic Crystals: Fundamentals and Applications, A. Khelif, A. Adibi, eds., Springer (2016), chap. 1.
11. Z. Liu et al., Science 289, 1734 (2000).
12. See, for example, C. E. Bradley, J. Acoust. Soc. Am. 96, 1854 (1994).
13. S. H. Lee et al., Phys. Rev. Lett. 104, 054301 (2010).
14. S. A. Cummer et al., Phys. Rev. Lett. 100, 024301 (2008).
15. A. N. Norris, Proc. R. Soc. A. 464, 2411 (2008).

Наукове видання

Кузьмичев Анатолій Іванович

Татарчук Дмитро Дмитрович

Богдан Олександр Володимирович

АУСТИЧНІ МЕТАМАТЕРІАЛИ

В авторській редакції
Комп'ютерний набір, верстка авторів

Підп. до друку 30.12.2025. Формат 60×90/16. Ум.-друк. арк. 1,9.
Наклад 300 пр. Зам № 176.
Видавництво ПП «Аверс».
а/с 55, м.Київ, 03056.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4461 від 28.12.2012.

Надруковано в типографії ТОВ «Direct Line»
М.Київ, вул.Васильківська, 28