

<b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b>	<b>102021000027965</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>03/11/2021</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>03/05/2023</b>

Classifiche IPC

<b>Sezione</b>	<b>Classe</b>	<b>Sottoclasse</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Sottogruppo</b>
H	02	N	2	18

Titolo

DISPOSITIVO MULTI-RISONATORE PER USO IN SISTEMI DI RACCOLTA ENERGIA O IN UN SISTEMA DI AZIONAMENTO

## DISPOSITIVO MULTI-RISONATORE PER USO IN SISTEMI DI RACCOLTA ENERGIA O IN UN SISTEMA DI AZIONAMENTO

### DESCRIZIONE

#### CAMPO DELL'INVENZIONE

5 L'invenzione riguarda il campo dei dispositivi risonanti, in particolare dispositivi che possono essere utilizzati per la raccolta di energia o come attuatori.

Il progetto che ha portato a questa domanda ha ricevuto un finanziamento dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea  
10 secondo l'accordo di concessione n. 952039.

#### ARTE NOTA

Lo studio di nuovi dispositivi a metamateriali ha attirato un crescente interesse all'interno della comunità di ricerca che lavora in diversi campi come, tra gli altri, l'elettromagnetismo (1; 2), l'acustica (3; 4) e l'elasticità (5).

15 Nel contesto delle onde elastiche, i progetti iniziali basati sullo scattering di Bragg e sul contrasto dei materiali sono stati utilizzati per creare bande proibite (*bandgap*) (6; 7; 8; 9; 10) che spesso hanno attinto idee della comunità dei cristalli fotonici.

Per spingere il regime operativo verso frequenze più basse, lo sfruttamento della risonanza locale ha ricevuto notevole attenzione (4; 11; 12; 13)  
20 per applicazioni in geofisica, ingegneria meccanica e civile (14; 15; 16) che coinvolgono spettri ambientali comuni. Mentre il concetto di *bandgap* è stato inizialmente impiegato per l'isolamento delle vibrazioni, è stato poi correlato a una varietà di fenomeni tra cui lenti (19; 20; 21), localizzazione (22) o stati  
25 topologici di bordo (23; 24).

Per capitalizzare questi recenti progetti di metamateriali, la raccolta di energia (*energy harvesting*) è un'applicazione attraente. La raccolta di energia basata sulle vibrazioni ha ricevuto una notevole attenzione negli ultimi due decenni, con l'obiettivo di alimentare i dispositivi utilizzando l'energia  
30 vibrazionale. L'opportunità di raccogliere energia dall'ambiente può potenzialmente eliminare il costo associato alla sostituzione delle batterie ed evitare il rifiuto chimico delle batterie convenzionali (25).

Tra i vari metodi di raccolta dell'energia possibili, i materiali piezoelettrici

sono ampiamente utilizzati grazie alla loro grande densità di potenza e alla facilità di applicazione (26; 27).

Una recente linea di lavoro sfrutta metodi per aumentare localmente l'energia vibrazionale nel tentativo di migliorare l'efficienza dei dispositivi piezoelettrici. Per esempio, questo può essere ottenuto focalizzando o localizzando l'energia delle onde acustiche/elastiche nella posizione di raccolta usando specchi, convogliatori (28), introducendo difetti (*defect modes*) (29) o lenti (30; 31).

Un altro approccio per amplificare il campo d'onda si basa sull'effetto arcobaleno, che rallenta efficacemente le onde e separa spazialmente le componenti in frequenza. Questi sistemi si basano su array periodici che variano gradualmente per sfruttare le bande proibite locali per controllare la propagazione delle onde. La fisica sottostante, capace di segregare spazialmente le componenti di frequenza, si basa sulla capacità di isolare le curve di dispersione delle strutture localmente periodiche all'interno dell'array. Un array graduato è formato variando gradualmente un particolare parametro, o un insieme di parametri, di elementi vicini in celle unitarie successive. Originariamente scoperto in elettromagnetismo usando guide d'onda planari assialmente non uniformi, linearmente rastremate, con nuclei di materiale ad indice negativo (32), c'è stata una intensa quantità di ricerche che hanno tradotto l'effetto arcobaleno in tutti i campi di propagazione delle onde classiche, compresa l'acustica (33; 34; 35; 36), onde d'acqua (37) e piastre elastiche caricate con fluidi (38). Progressi particolari sono stati recentemente riportati in dispositivi elastici costituiti da array di aste risonanti per substrati elastici profondi (17; 18; 39; 40) per convertire onde di Rayleigh (R) in onde di Taglio (*Shear*) (S) o di Pressione (P). Tali linee di array graduati di risonatori sono state teorizzate, progettate e realizzate anche per applicazioni di raccolta energia (41; 42; 43; 44). In questo contesto, i meccanismi di riflessione e intrappolamento arcobaleno sono impiegati per migliorare il tempo di interazione tra le onde e il sistema di raccolta, riportando una maggiore potenza in uscita rispetto ai progetti non graduati.

De Ponti et al. (41) rendono noto un metamateriale che include una trave di alluminio con sezione 10mm x 30mm che è aumentata da un array di 30 aste risonanti di lunghezza variabile e sezione quadrata. In questo lavoro, un raccoglitore piezoelettrico è posto su un'estremità di una delle aste con elettrodi a sbalzo liberi di oscillare mentre un'onda di ingresso viaggia lungo la trave. De

Ponti et al. mostrano che l'effetto arcobaleno può essere usato per diminuire la velocità dell'onda nella trave e per confinare l'energia dell'onda in prossimità delle aste, aumentando così la raccolta di energia. In questo documento, le aste risonanti sono poste su uno stesso lato della trave di alluminio e gli elettrodi a sbalzo sono posti in un piano ortogonale all'asta.

Dispositivi che utilizzano risonatori a sbalzo con elementi piezoelettrici sono anche noti da alcuni brevetti.

US 8,169,124 rende noto un sensore fisico/biochimico che utilizza micro-risonatori piezoelettrici a sbalzo. Un array di risonatori è posto su un lato di un substrato di silicio. Ogni risonatore include uno strato di supporto che supporta uno strato sottile piezoelettrico che si trova posizionato tra un elettrodo inferiore e un elettrodo superiore. Gli strati di supporto dei risonatori sono allineati in modo che le loro lunghezze si riducano gradualmente. I risonatori hanno diverse costanti elastiche a seconda della loro lunghezza; pertanto, sono sensibili a diversi carichi verticali e sollecitazioni superficiali. Nell'esempio descritto in questo brevetto, un anticorpo umano è immobilizzato sui risonatori. Gli esperimenti dimostrano che ogni risonatore dell'array subisce un diverso spostamento di frequenza, quindi il sensore può essere utilizzato per rilevare diversi materiali target confrontando gli spostamenti di frequenza rilevati con quelli di materiali target.

US 6,858,970 rende noto un raccoglitore di energia multifrequenza. Un dispositivo piezoelettrico collegato ad una fonte di vibrazione converte l'energia di vibrazione in corrente elettrica. Una pluralità di coppie di wafer piezoelettrici polarizzate in modo opposto si flette per produrre una corrente elettrica. Ogni coppia di wafer è disposta una contro l'altra e collegata elettricamente. Le coppie di wafer sono collegate ciascuna ad un insieme di parti micro-lavorate. Ogni coppia di wafer forma un bimorfo, configurato come una trave a sbalzo collegata ad un insieme di parti per formare un elemento. Ciascuna trave a sbalzo ha una massa fissata ad una prima estremità ed è fissata ad una o più guaine flessibili ad una seconda estremità.

CN106856380 rende noto un dispositivo piezoelettrico di raccolta dell'energia, che comprende uno scheletro di base, una serie di aste a sbalzo, magneti ed elementi di generazione di energia piezoelettrica. Lo scheletro di base è composto da tubi metallici distribuiti secondo tre assi cartesiani. L'array di aste a sbalzo è composto da più aste a sbalzo che sono disposte in modo sequenziale

dalla più corta alla più lunga. Ogni tubo metallico dello scheletro di base è dotato di una serie di aste a sbalzo ortogonali al tubo metallico. L'estremità terminale di ogni asta a sbalzo nella serie di aste a sbalzo è dotata di un magnete. I magneti di due aste a sbalzo adiacenti sono posizionati con gli stessi poli magnetici uno di fronte all'altro. L'elemento di generazione di energia piezoelettrica aderisce alla base di ogni asta a sbalzo.

Anche se sono state proposte diverse soluzioni per la raccolta di energia usando elementi piezoelettrici, c'è bisogno di dispositivi che possano essere facilmente fabbricati e che permettano una raccolta di energia efficiente.

## 10 CITAZIONI

[1] J. B. Pendry, Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).

[2] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbinsand, W. J. Stewart, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47 2075–84 (1999).

[3] R. V. Craster, S. Guenneau, Acoustic Metamaterials, Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking, Springer Series in Materials Science (2013), 1–324.

[4] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan P. Sheng, Locally resonant sonic materials, Science 289 1734–1736 (2000).

[5] R. V. Craster, S. Guenneau, World Scientific Handbook of Metamaterials and Plasmonics: Volume 2: Elastic, Acoustic and Seismic Metamaterials, Singapore: World Scientific (2017).

[6] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, Acoustic band structure of periodic elastic composites, Phys. Rev. Lett. 71, 2022 (1993).

[7] J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Chenni, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, D. Prevost, Experimental and Theoretical Evidence for the Existence of Absolute Acoustic Band Gaps in Two-Dimensional Solid Phononic Crystals, Phys. Rev. Lett. 86, 3012 (2001).

[8] A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, P. A. Deymier, Transmission and dispersion relations of perfect and defect-containing waveguide structures in phononic band gap materials, Phys. Rev. B 68, 024302 (2003).

- [9] Y. Pennec, B. D. Rouhani, C. Li, J. M. Escalante, A. Martinez, S. Benchabane, V. Laude, N. Papanikolaou, Band gaps and cavity modes in dual phononic and photonic strip waveguides, *AIP Advances* 1, 041901 (2011).
- [10] V. Laude, *Phononic Crystals Artificial Crystals for Sonic, Acoustic, and Elastic Waves*, De Gruyter (2015).
- [11] A. E. Miroshnichenko, S. Flach, Y. S. Kivshar, Fano resonances in nanoscale structures, *Rev. Mod. Phys.* 82, 2257 (2010).
- [12] F. Lemoult, M. Fink, G. Lerosey, Acoustic Resonators for Far-Field Control of Sound on a Subwavelength Scale, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011).
- [13] E. G. Williams, P. Roux, M. Rupin, W. A. Kuperman, Theory of multiresonant metamaterials for A0 Lamb waves, *Phys. Rev. B* 91, 104307 (2015).
- [14] M. Miniaci, A. Krushynska, F. Bosia and N. M. Pugno, Large scale mechanical metamaterials as seismic shields, *New J. Phys.* 18 083041 (2016).
- [15] Y. Achaoui, T. Antonakakis, S. Brul'e, R. V. Craster, S. Enoch, S. Guenneau, Clamped seismic metamaterials: ultra-low frequency stop bands, *New J. Phys.* 19 063022 (2017).
- [16] A. Colombi, P. Roux, S. Guenneau, P. Gueguen, R. V. Craster, Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances, *Sci. Rep.* 6, 19238 (2016).
- [17] A. Colombi, D. Colquitt, P. Roux, S. Guenneau, R. V. Craster, A seismic metamaterial: The resonant metawedge, *Sci. Rep.* 6 (1) (2016) 1–6.
- [18] A. Colombi, V. Ageeva, R. J. Smith, A. Clare, R. Patel, M. Clark, D. Colquitt, P. Roux, S. Guenneau, R. V. Craster, Enhanced sensing and conversion of ultrasonic Rayleigh waves by elastic metasurfaces, *Sci. Rep.* 7 (1) (2017) 6750.
- [19] A. Colombi, Resonant metalenses for flexural waves in plates, *J. Acoust. Soc. Am.* 140, EL423 (2016).
- [20] R. Fuentes-Dominguez, M. Yao, A. Colombi, P. Dryburgh, D. Pieris, A. Jackson-Crisp, D. Colquitt, A. Clare, R. J. Smith, M. Clark, Design of a resonant Luneburg lens for surface acoustic waves, *Ultrasonics* 111, 106306 (2021).
- [21] G. J. Chaplain, R. V. Craster, Flat lensing by graded line meta-arrays, *Phys. Rev. B* 99, 220102(R) (2019).

[22] M. Lott, P. Roux, L. Seydoux, B. Tallon, A. Pelat, S. Skipetrov, A. Colombi, Localized modes on a metasurface through multiwave interactions, *Phys. Rev. Materials* 4, 065203 (2020).

[23] R. K. Pal, M. Ruzzene, Edge waves in plates with resonators: an elastic  
5 analogue of the quantum valley Hall effect, *New J. Phys.* 19 025001 (2017).

[24] Y. Xia, A. Erturk, M. Ruzzene, Topological Edge States in Quasiperiodic Locally Resonant Metastructures, *Phys. Rev. Applied* 13, 014023 (2020).

[25] A. Erturk, N. Elvin, *Advances in Energy Harvesting Methods*,  
10 Springer (2013).

[26] A. Erturk, D. J. Inman, *Piezoelectric Energy*, Wiley (2011).

[27] S. R. Anton, H. A. Sodano, A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006) *Smart Mater. Struct.* 16 R1–21 (2007).

[28] M. Carrara, M. R. Cacan, J. Toussaint, M. Leamy, M. Ruzzene, A.  
15 Erturk, Metamaterial-inspired structures and concepts for elastoacoustic wave energy harvesting *Smart Mater. Struct.* 22 065004 (2013).

[29] S. Qi, M. Oudich, Y. Li, B. Assouar, Acoustic energy harvesting based on a planar acoustic metamaterial, *Appl. Phys. Lett.* 108, 263501 (2016).

[30] S. Tol, F. L. Degertekin, A. Erturk, Phononic crystal Luneburg lens for  
20 omnidirectional elastic wave focusing and energy harvesting, *Appl. Phys. Lett.* 111, 013503 (2017).

[31] A. Allam, K. Sabra, A. Erturk, Sound energy harvesting by leveraging a 3D-printed phononic crystal lens, *Appl. Phys. Lett.* 118, 103504 (2021).

[32] K. L. Tsakmakidis, A. D. Boardman, O. Hess, ‘Trapped rainbow’  
25 storage of light in metamaterials, *Nature* volume 450, pages397–401(2007).

[33] J. Zhu, Y. Chen, X. Zhu, F. J. Garcia-Vidal, X. Yin, W. Zhang, and X. Zhang, “Acoustic rainbow trapping,” *Sci. Rep.* 3, 1728 (2013).

[34] V. Romero-García, R. Picò, A. Cebrecos, V. J. Sanchez-Morcillo, and K. Staliunas, Enhancement of sound in chirped sonic crystals, *Appl. Phys. Lett.*  
30 102, 091906 (2013).

[35] A. Cebrecos, R. Picò, V. J. Sanchez-Morcillo, K. Staliunas, V. Romero-

García, L. M. Garcia-Raffi, Enhancement of sound by soft reflections in exponentially chirped crystals, *AIP Advances* 4, 124402 (2014).

[36] Y. Chen, H. Liu, M. Reilly, H. Bae, M. Yu, Enhanced acoustic sensing through wave compression and pressure amplification in anisotropic metamaterials, *Nat. Commun.* 5, 5247 (2014).

[37] L. G. Bennetts, M. A. Peter, R. V. Craster, Graded resonator arrays for spatial frequency separation and amplification of water waves, *J. Fluid Mech.* 854 R4 (2018).

[38] E. A. Skelton, R. V. Craster, A. Colombi, D. J. Colquitt, the multi-physics metawedge: graded arrays on fluid-loaded elastic plates and the mechanical analogues of rainbow trapping and mode conversion, *New J. Phys.* 20 053017 (2018).

[39] D. Colquitt, A. Colombi, R. Craster, P. Roux, S. Guenneau, Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and rayleigh wave interaction, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 99 (2017) 379–393.

[40] G. J. Chaplain, J. M. De Ponti, A. Colombi, R. Fuentes-Dominguez, P. Dryburg, D. Pieris, R. J. Smith, A. Clare, M. Clark, R. V. Craster, Tailored elastic surface to body wave Umklapp conversion, *Nat. Commun.* 11 (2020) 1–6.

[41] J. M. De Ponti, A. Colombi, E. Riva, R. Ardito, F. Braghin, A. Corigliano, R. V. Craster, Experimental investigation of amplification, via a mechanical delay-line, in a rainbow-based metamaterial for energy harvesting, *Appl. Phys. Lett.* 117, 143902 (2020).

[42] G. J. Chaplain, D. Pajer, J. M. De Ponti, R. V. Craster, Delineating rainbow reflection and trapping with applications for energy harvesting, *New J. Phys.* 22 063024 (2020).

[43] J. M. De Ponti, Graded elastic metamaterials for energy harvesting, Springer (2021)

[44] M. Alshaq, A. Erturk, Graded multifunctional piezoelectric metastructures for wideband vibration attenuation and energy harvesting, *Smart Mater. Struct.* 30 015029 (2021).

[45] G. Abaqus, Abaqus 6.11, Dassault Systemes Simulia Corp Providence, RI, USA.



## SCOPI E BREVE RIASSUNTO DELL'INVENZIONE

È uno scopo della presente invenzione superare gli svantaggi dell'arte nota

In particolare, uno scopo dell'invenzione è di presentare un dispositivo  
risonatore compatto che può essere usato per la raccolta efficiente di energia o  
5 come attuatore.

Un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di presentare un dispositivo di  
raccolta dell'energia a banda larga che possa raccogliere in modo efficiente  
energia trasportata dalle vibrazioni meccaniche a diverse frequenze.

Questi ed ulteriori scopi della presente invenzione sono raggiunti per  
10 mezzo di un dispositivo piezoelettrico di raccolta energia che incorpora le  
caratteristiche delle rivendicazioni allegate, che formano una parte integrante  
della presente descrizione.

In un aspetto, l'invenzione è diretta ad un dispositivo risonatore che  
comprende una guida d'onda per la propagazione di un'onda meccanica e un  
15 array graduato di risonatori a sbalzo disposti su un lato della guida d'onda. Ogni  
risonatore dell'array comprende uno strato di supporto che supporta un  
elemento piezoelettrico. La guida d'onda è di forma laminare e ha lo stesso  
spessore degli strati di supporto dei risonatori. Inoltre, due estremità della guida  
d'onda sono collegate ciascuna ad un rispettivo elemento di supporto che solleva  
20 la guida d'onda rispetto ad un piano inferiore e permette alla guida d'onda di  
oscillare in un piano ortogonale ad un piano che comprende una faccia principale  
della guida d'onda.

Questa soluzione permette di raccogliere efficacemente energia dalla  
propagazione di onde meccaniche, in particolare onde flessionali che si  
25 propagano nella guida d'onda. L'array graduato permette lo sfruttamento  
dell'effetto arcobaleno, aumentando l'interazione delle onde a diverse frequenze  
con i rispettivi risonatori nell'array graduato, aumentando così il trasferimento  
di energia dall'onda agli elementi piezoelettrici.

In una forma di realizzazione, le lunghezze dei risonatori a sbalzo sono  
30 graduate secondo una linea retta inclinata di un angolo  $\theta$ , rispetto all'asse  
longitudinale della guida d'onda, che è preferibilmente compreso tra  $3^\circ$  (tre  
gradi) e  $7^\circ$  (sette gradi) e più preferibilmente è  $5,2^\circ$  (cinque virgola due gradi).

Anche se sono possibili altri modi per graduare l'array, ad esempio la lunghezza potrebbe aumentare secondo una legge esponenziale o parabolica, diversi test hanno individuato questa configurazione come preferita.

5 In una forma di realizzazione, il dispositivo risonatore comprende inoltre un secondo array graduato di risonatori a sbalzo, detto secondo array graduato di risonatori a sbalzo è identico al detto array graduato di risonatori a sbalzo ed è disposto su un secondo lato della guida d'onda opposto all'altro array graduato.

10 La simmetria di questa soluzione riduce i movimenti torsionali della guida d'onda durante la propagazione dell'onda meccanica. Questo aumenta l'efficienza del risonatore quando viene utilizzato in un sistema di raccolta dell'energia.

15 Preferibilmente, la guida d'onda e gli strati di supporto dei risonatori sono realizzati in un unico pezzo. Anche questa soluzione sembra aumentare il trasferimento di energia dall'onda ai risonatori, aumentando così l'efficienza del dispositivo.

20 In una forma di realizzazione, sia lo strato di supporto che l'elemento piezoelettrico di ogni risonatore a sbalzo sono di forma laminare, e l'elemento piezoelettrico è disposto su una faccia principale dello strato di supporto. Questa soluzione è preferita rispetto ad altre in cui lo strato piezoelettrico non è parallelo allo strato di supporto perché la fabbricazione dello stesso è più facile.

25 Secondo un secondo aspetto, l'invenzione è diretta ad un sistema di raccolta energia che comprende un dispositivo risonatore come descritto sopra e più dettagliatamente nella descrizione che segue. Il sistema, inoltre, comprende mezzi di stoccaggio energia collegati elettricamente agli elementi piezoelettrici dei risonatori per immagazzinare l'energia elettrica generata dagli elementi piezoelettrici quando la guida d'onda oscilla.

In una forma di realizzazione, il sistema di raccolta inoltre comprende un'interfaccia elettrica che permette l'accesso all'energia immagazzinata nei mezzi di stoccaggio energia.

30 Secondo un terzo aspetto, l'invenzione è diretta ad un metodo per la raccolta di energia con un sistema di energia come descritto sopra e più dettagliatamente nella descrizione che segue. Secondo il metodo, gli elementi di supporto del dispositivo risonatore sono collegati ad una superficie di sostegno

e la guida d'onda è orientata in modo tale che un'onda di flessione, causata dalla vibrazione della superficie di sostegno, si propaghi nella guida d'onda in una direzione che va dal risonatore con lunghezza inferiore al risonatore di lunghezza superiore.

5           La raccolta di energia è più efficiente orientando la guida d'onda in questo modo.

          In una forma di realizzazione, gli elementi di supporto del dispositivo risonatore sono travi. Il metodo prevede quindi di collegare le estremità di ogni trave alla superficie di supporto, lasciando preferibilmente la porzione  
10       intermedia della trave libera di oscillare. Questa soluzione rende più efficiente la raccolta di energia.

          Secondo un quarto aspetto, l'invenzione è diretta a un sistema di attuazione che comprende un dispositivo risonatore come descritto sopra e più in dettaglio nella descrizione che segue.

15           In una forma di realizzazione, il sistema di azionamento comprende anche un generatore di segnale elettrico e un'unità di controllo. Il generatore di segnale elettrico è collegato elettricamente agli strati piezoelettrici dei risonatori. L'unità di controllo è collegata operativamente al generatore di segnale elettrico e adatta a controllarlo per generare un segnale elettrico ad una frequenza predeterminata,  
20       causando quindi l'oscillazione di almeno un risonatore che ha frequenza di risonanza uguale alla frequenza predeterminata.

          In un'altra forma di realizzazione, il sistema di azionamento comprende un vibratore accoppiato meccanicamente ad uno degli elementi di supporto, in particolare a quello che è più vicino al più corto dei risonatori a sbalzo. Il  
25       vibratore è adatto a generare onde flessionali all'interno della guida d'onda a frequenze corrispondenti alle frequenze di risonanza dei risonatori a sbalzo.

          Ulteriori caratteristiche e scopi della presente invenzione saranno più evidenti dalla descrizione che segue.

#### **BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI**

30           L'invenzione è descritta qui di seguito con riferimento ad alcuni esempi forniti a titolo di esempio non limitativo e illustrati nei disegni allegati. Questi disegni illustrano diversi aspetti e forme di realizzazione della presente invenzione e i numeri di riferimento che illustrano strutture, componenti,

materiali e/o elementi simili in diversi disegni sono indicati da numeri di riferimento simili, ove opportuno.

La figura 1 è una vista prospettica di un dispositivo risonatore secondo una forma di realizzazione dell'invenzione;

5           La figura 2 è una vista in sezione del dispositivo di figura 1 nel piano A-A;

La figura 3 è una vista in sezione di un dispositivo alternativo a quello di figura 1;

10           La figura 4 è una vista in sezione di un dispositivo alternativo a quello di figura 1 o 2;

La figura 5 è una vista dall'alto del dispositivo di figura 1;

Le figure 6a e 6b mostrano rispettivamente una vista dall'alto e una sezione trasversale di una cella del dispositivo di figura 1;

15           La figura 7 illustra le curve di dispersione in un sistema periodico ideale che comprende un numero infinito di celle del tipo di figura 6a e 6b;

La figura 8 illustra i risultati comparativi dell'energia generata dal dispositivo a cella singola (risonatore singolo) di figura 9b e dall'array graduato di figura 9a;

20           La figura 9a illustra un dispositivo risonatore ad array graduato secondo la figura 1 con l'evidenza di una cella che genera energia;

La figura 9b illustra un dispositivo risonatore singolo con l'evidenza di una cella che genera energia;

25           La figura 10 illustra una vibrazione applicata al dispositivo con array graduato della figura 9a e al dispositivo risonatore singolo della figura 9b per misurare i risultati della figura 8;

La figura 11 illustra una simulazione dei risultati di raccolta energia quando una vibrazione a banda larga, illustrata in figura 11, viene applicata al dispositivo di figura 1;

30           La figura 12 illustra un sistema di raccolta energia che comprende il dispositivo risonatore della figura 1;

La figura 13 illustra un sistema di attuazione che utilizza il dispositivo

risonatore della figura 1.

## DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

Mentre l'invenzione è suscettibile di varie modifiche e costruzioni alternative, alcune forme di realizzazione preferite sono mostrate nei disegni e sono descritte qui di seguito in dettaglio. È in ogni caso da notare che non c'è alcuna intenzione di limitare l'invenzione alla specifica forma di realizzazione illustrata piuttosto, al contrario, l'invenzione intende coprire tutte le modifiche, costruzioni alternative ed equivalenti che rientrano nell'ambito dell'invenzione come definito nelle rivendicazioni.

L'uso di "per esempio", "ecc.", "o" indica alternative non esclusive senza limitazione, se non diversamente indicato. L'uso di "include" o "comprende" significa rispettivamente "include, ma non limitato a", e "comprende, ma non limitato a", salvo diversa indicazione.

La Figura 1 illustra un dispositivo 1 che può funzionare come un raccoglitore di energia o come un attuatore.

Il dispositivo 1 comprende una guida d'onda elastica 2 collegata tra due elementi di supporto, in particolare due travi di supporto 3. Ogni trave di supporto 3 comprende una faccia inferiore 30 destinata ad appoggiarsi su una superficie vibrante. La forma delle travi di supporto 3 e il modo in cui le travi di supporto sono collegate alla superficie vibrante possono essere diversi, ad esempio in una forma di realizzazione solo le due estremità opposte 31 e 32 di ogni trave di supporto possono essere fissate, ad esempio tramite colla o viti o altri mezzi di fissaggio, alla superficie vibrante, permettendo così alla parte centrale 33 della trave portante di essere libera di muoversi nella direzione Z. Operativamente, il dispositivo 1 sarà fissato alla superficie vibrante con la guida d'onda 2 disposta nella direzione in cui ci si aspetta che la vibrazione della superficie vibrante si propaghi.

La guida d'onda è collegata alle travi di supporto in modo tale che la guida d'onda sia sollevata dalla superficie vibrante ed è quindi libera di oscillare se viene applicata una vibrazione meccanica su una delle travi di supporto, in particolare nel punto P indicato in figura 1.

Due array di risonatori a sbalzo 4 sono collocati su due lati opposti della guida d'onda elastica 2. Ogni array comprende una pluralità di risonatori 4 di lunghezza linearmente crescente.

Come mostrato in figura 2, ogni risonatore comprende uno strato di supporto elastico inferiore 40 e uno strato piezoelettrico sottile superiore 41. Preferibilmente lo strato di supporto elastico 40 e la guida d'onda sono fatti dello stesso materiale elastico.

5 Quando si genera una vibrazione meccanica in P, ad esempio come conseguenza di movimenti della superficie su cui sono posizionate le travi di supporto 3, un'onda meccanica si propaga lungo la guida d'onda 2 e causa l'oscillazione di uno o più risonatori 4, facendo sì che lo strato piezoelettrico 41 generi una carica elettrica che può essere raccolta in un dispositivo di stoccaggio  
10 (non mostrato in figura 1), attraverso una coppia di elettrodi opportunamente collegati agli strati piezoelettrici 41 dei risonatori 4. Il dispositivo di stoccaggio può essere un qualsiasi dispositivo adatto ad immagazzinare la carica elettrica, ad esempio un condensatore o una batteria.

Allo stesso modo, se una tensione con frequenza e ampiezza opportune  
15 viene applicata agli strati piezoelettrici attraverso gli elettrodi, i risonatori 4 si piegano a causa degli strati piezoelettrici che convertono la corrente elettrica in vibrazioni meccaniche. In questo modo, è possibile utilizzare il dispositivo 1 come un attuatore efficiente, in cui un'unità di controllo genera una tensione di controllo che viene applicata agli elettrodi e che provoca la flessione di uno o più  
20 risonatori 4.

Gli elettrodi possono essere qualsiasi tipo di elettrodi conosciuti adatti ad essere collegati agli strati piezoelettrici 41, ad esempio possono essere cavi elettrici o piste elettriche collegate su due superfici opposte degli strati piezoelettrici 41.

25 Nell'esempio di figura 3, uno degli elettrodi comprende uno strato conduttivo 5, non mostrato in figura 1, che giace sopra gli strati piezoelettrici 41 dei risonatori e sopra uno strato elettricamente isolante 6 che è posto sulla guida d'onda 2. Lo strato conduttivo 5 può essere fatto di qualsiasi materiale conduttivo, ad esempio rame o oro. L'altro elettrodo, invece, comprende lo strato  
30 di supporto 40 che, in questo esempio, è fatto di un materiale elettricamente conduttivo, ad esempio alluminio o rame.

In un ulteriore esempio illustrato in figura 4, lo strato piezoelettrico 41 è posto tra due strati conduttivi 50, 51 che fungono da elettrodi, e l'elettrodo inferiore 51 è separato dallo strato di supporto 40 per mezzo di uno strato elettricamente isolante 61. Uno strato elettricamente isolante 60 è anche posto tra  
35

i due strati conduttivi 50 e 51 nella regione sopra la guida d'onda 2 e tra due strati piezoelettrici opposti 41.

In una forma di realizzazione preferita, gli array di risonatori 4 sono graduati secondo una legge monotona crescente che, nella forma della figura 1, è rappresentata da una linea retta 7 inclinata di un angolo  $\theta$  che è preferibilmente compreso tra  $3^\circ$  e  $7^\circ$  e più preferibilmente è  $5,2^\circ$ . In altre parole, nella forma di realizzazione di figura 1 e 5, i punti medi del bordo libero di ogni risonatore 4 di uno stesso array, si trovano sulla linea retta 7 che è inclinata di un angolo  $\theta$  rispetto all'asse longitudinale X della guida d'onda 2.

In una forma di realizzazione diversa, i punti medi del bordo libero di ogni risonatore 4 di uno stesso array sono disposti secondo una diversa legge monotona crescente, per esempio secondo una curva esponenziale o parabolica.

La frequenza di risonanza  $f_i$  di ogni risonatore diminuisce all'aumentare della lunghezza L del risonatore. Pertanto, come mostrato in figura 1, applicando una vibrazione meccanica in P, l'onda si propaga attraverso la guida d'onda 2 in direzione X e incontra risonatori con frequenza di risonanza decrescente, cioè  $f_i > f_n$ .

Il dispositivo 1 comprende una pluralità di celle 10, nove nell'esempio della figura 5, ciascuna delle quali comprende una coppia di risonatori 3 come mostrato nella figura 6a (vista dall'alto) e 6b (vista laterale). Le celle 10 hanno tutte la stessa dimensione D, dove D è compresa nel seguente intervallo:

$$\frac{\lambda_0}{15} < D < \frac{\lambda_0}{2} \quad (1)$$

dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda dell'onda flessionale fondamentale (A0) che si propaga in un dispositivo 1 privo di risonatori a sbalzo, e dotata solo di una guida d'onda 2 sospesa tra due elementi di supporto. In particolare,  $\lambda_0$  può essere calcolata secondo la seguente formula:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{\left[\frac{\rho A \omega^2}{EI}\right]^{\frac{1}{4}}} \quad (2)$$

dove:

$\rho$ :=densità del materiale

A:=sezione della guida d'onda

$\omega$ :=frequenza angolare di funzionamento

$E$ :=modulo di Young

$I$ :=momento d'inerzia della sezione di guida d'onda

5 Le dimensioni  $D$  delle celle 10 dipendono quindi dall'applicazione a cui è destinato il dispositivo.

Questa distribuzione delle lunghezze (e di conseguenza delle frequenze) dei risonatori permette di sfruttare l'effetto arcobaleno e fornisce diversi vantaggi come dimostrato dai dati seguenti.

10 La figura 7 mostra una curva di dispersione che mostra la relazione esistente tra il numero d'onda ( $k$ ) e la frequenza d'onda ( $f$ ) quando l'onda si propaga in un sistema costituito da un numero infinito di celle 10 di dimensioni identiche. L'esempio di figura 7 è ottenuto come simulazione per celle aventi le seguenti dimensioni:

- 15 • Lunghezza della cella,  $D = 128\mu\text{m}$
- Larghezza della guida d'onda,  $L_w = 60\mu\text{m}$
- Lunghezza del risonatore,  $L = 223\mu\text{m}$
- Larghezza del risonatore,  $d = 50\mu\text{m}$
- Spessore dello scheletro della cella,  $W_s = 17\mu\text{m}$
- Spessore dello strato piezoelettrico,  $W_p = 2\mu\text{m}$

20 Come è noto, la derivata della curva di dispersione indica la velocità di gruppo ( $v_g$ ), in direzione  $X$ , dell'onda nella cella.

In figura 7, la linea continua  $A_0$  rappresenta la curva di dispersione del modo fondamentale di un'onda flessionale, ottenuta eccitando il dispositivo in  $P$  nella direzione  $Z$ , che si propaga in una cella che ha solo una guida d'onda e  
 25 nessun risonatore. Le linee con i punti rappresentano le curve di dispersione delle onde, ottenute eccitando il dispositivo in  $P$  nella direzione  $Z$ , che si propagano nel sistema con un numero infinito di celle. La linea con punti quadrati rappresenta la curva di dispersione di un'onda che oscilla solo nel piano  $XY$ .

30 Concentrandosi sulla propagazione di onde che oscillano solo nel piano  $XZ$  (indicate con linee a pallini), vediamo che una curva 700 ha velocità di gruppo nulla in  $X_0$ , cioè l'onda che ha frequenza  $f_i$  ed entra nella cella rallenta mentre parte dell'energia viene invertita e si propaga indietro. Usando un array graduato, la velocità di gruppo di tale onda viene ridotta in modo uniforme,



permettendo di diminuire le riflessioni dell'onda. Inoltre, i risonatori con frequenza di risonanza  $f_j < f_i$  creano un *bandgap*, migliorando così il confinamento dell'onda. L'interazione di questi due effetti massimizza il trasferimento di energia tra l'onda e i risonatori. Parallelamente, la presenza di diversi risonatori con diverse frequenze di risonanza aumenta le capacità a banda larga del sistema.

Questo è chiaro dalla figura 8 che mostra un confronto dell'energia trasferita da un'onda di frequenza  $f_i$  a una cella risonante 80 di un sistema ad array graduato (figura 9a) e a una cella risonante 81 di un dispositivo con una sola cella risonante (figura 9b). I risultati mostrano chiaramente che gli strati piezoelettrici della cella 80, che fa parte dell'array graduato, generano molta più energia elettrica (proporzionale al quadrato della tensione indicata nella figura 8) rispetto all'energia prodotta dalla singola cella 81 della figura 9b. I risultati della figura 8 si riferiscono ad una particolare forma di realizzazione in cui:

- il dispositivo comprende una struttura in alluminio (modulo di Young  $E_a = 70$  GPa, rapporto di Poisson  $\nu_a = 0.33$ , e densità  $\rho_a = 2710$  kg/m<sup>3</sup>) dotata di patch monomorfe PZT-5H poste sulla parte superiore dei risonatori (modulo di Young  $E_p = 61$  GPa, rapporto di Poisson  $\nu_a = 0.31$ , densità  $\rho_a = 7800$  kg/m<sup>3</sup>, costante dielettrica  $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 3500$ , con  $\epsilon_0 = 8,854$  pF/m permittività in spazio libero, e coefficiente piezoelettrico  $e_{31} = -9.2$  C/m<sup>2</sup>);
- la cella 80 ha le stesse dimensioni della cella della figura 6 discussa sopra,
- L'array graduato della figura 9a comprende nove celle disposte secondo lo schema della figura 5 con un angolo  $\theta = 5,2^\circ$ ;
- Entrambi i dispositivi di figura 9a e 9b sono sollecitati da un segnale  $p(t)$  come mostrato in figura 10 mentre sono bloccati alle quattro estremità 31,32 degli elementi di supporto 3.

I risultati di figura 8 sono stati ottenuti utilizzando un modello numerico basato su una discretizzazione ad elementi finiti del sistema tramite ABAQUS CAE 2018. In particolare, la guida d'onda e i risonatori sono modellati attraverso elementi quadratici soggetti a sforzi 3D completi (C3D20), mentre le interazioni elettromeccaniche sono considerate tramite elementi piezoelettrici 3D lineari (C3D8E). La relazione di dispersione è ottenuta eseguendo analisi modali con uno studio (*sweep*) parametrico sul vettore d'onda  $k$  lungo i bordi della Zona di Brillouin Irriducibile (*Irreducible Brillouin Zone*, IBZ). I risultati nel dominio del tempo sono ottenuti con analisi implicite basate sull'operatore Hilber-Hughes-

Taylor, con un incremento di tempo costante  $dt = 0,1 \mu s$ .

La figura 11 mostra il comportamento del dispositivo 1 in banda larga, cioè quando è stimolato da un segnale con una frequenza compresa tra la frequenza di risonanza dell'ultimo risonatore ( $f_n$ ) e la frequenza di risonanza del primo risonatore ( $f_1$ ). I due grafici di Figura 11 (indicati con (a) e (b) ) mostrano che i risonatori più lontani dal punto di ingresso P del segnale (aventi frequenze di risonanza più basse) si attivano per primi, seguiti da quelli più vicini al punto di ingresso del segnale (aventi frequenze di risonanza più alte). In particolare, il grafico (b) permette di apprezzare l'effetto arcobaleno, cioè la separazione nello spazio delle frequenze.

Alla luce di quanto sopra, è chiaro che il dispositivo secondo l'invenzione permette di raccogliere in modo efficiente l'energia trasportata dalla meccanica in un'ampia gamma di frequenze. La figura 12 mostra un sistema di raccolta 100 che comprende il dispositivo dell'invenzione. Il sistema di raccolta 100 comprende anche mezzi di stoccaggio 101, ad esempio un condensatore o una batteria, per immagazzinare l'energia elettrica generata dagli strati piezoelettrici 41 quando un'onda meccanica si propaga nella guida d'onda 2. I mezzi di stoccaggio sono collegati elettricamente agli strati piezoelettrici dei risonatori 4 per mezzo di elettrodi 102, 103. Il sistema 100 comprende anche un'interfaccia elettrica 104 che permette l'accesso all'energia immagazzinata nei mezzi di stoccaggio 101, ad esempio l'interfaccia elettrica può comprendere un connettore o un interruttore collegato elettricamente ai mezzi di stoccaggio, permettendo così a un carico elettrico di ricevere l'energia elettrica una volta collegato al connettore.

Per raccogliere energia con il sistema di raccolta 100, gli elementi di supporto 3 del dispositivo risonatore 1 sono collegati a una superficie di supporto che ci si aspetti vibrare. Collegando gli elementi di supporto 3 alla superficie di supporto, la guida d'onda 2 è orientata in modo tale che un'onda flessionale, causata dalla vibrazione della superficie di supporto, si propaga nella guida d'onda 2 in una direzione che va dal risonatore di lunghezza inferiore al risonatore di lunghezza superiore. Se gli elementi di supporto sono travi, come nell'esempio descritto, preferibilmente le estremità di ogni trave sono collegate alla superficie di supporto, mentre la porzione intermedia della trave è lasciata libera di oscillare.

Allo stesso modo, i risultati di cui sopra mostrano che il dispositivo può

essere efficacemente utilizzato come attuatore di un sistema di attuazione. La figura 13 mostra un tale sistema di attuazione 1000 che comprende un dispositivo 1 secondo l'invenzione e un generatore di segnale elettrico 130. Il generatore di segnale elettrico è configurato per generare un segnale elettrico a una frequenza  
5 predeterminata che può essere selezionata da un'unità di controllo 131 collegata operativamente al generatore di segnale elettrico 130 e adatta a controllarlo. Il generatore di segnale elettrico 130 applica il segnale elettrico agli elettrodi 132 e 133 che sono collegati agli strati piezoelettrici dei risonatori. Applicando un segnale elettrico di frequenza  $f_i$ , il sistema provoca l'oscillazione dell' $i$ -esimo  
10 risonatore avente frequenza di risonanza  $f_i$ .

In un'altra forma di realizzazione, il sistema di attuazione comprende un vibratore accoppiato meccanicamente ad uno degli elementi di supporto, in particolare a quello che è più vicino al più corto dei risonatori a sbalzo. Il vibratore è adatto a generare onde flessionali all'interno della guida d'onda con  
15 frequenze corrispondenti alle frequenze di risonanza dei risonatori a sbalzo.

Dalla descrizione di cui sopra è chiaro che l'invenzione fornisce diversi vantaggi. La persona esperta nell'arte capirà anche che diverse modifiche possono essere apportate alle forme di realizzazione sopra illustrate e che le caratteristiche descritte con riferimento a una forma di realizzazione possono  
20 essere applicate anche ad altre, per esempio, i sistemi di figura 12 e 13 sono stati descritti con riferimento al dispositivo risonatore di figura 1, ma un dispositivo risonatore con le caratteristiche illustrate nelle figure 2-4 potrebbe essere ben utilizzato in questi sistemi.

Allo stesso modo, l'invenzione non è limitata a un dispositivo risonatore  
25 con le dimensioni descritte sopra. Mentre le forme di realizzazione sopra descritte si riferiscono a dispositivi in cui i risonatori hanno dimensioni dell'ordine di decine o centinaia di micron, sono state effettuate con successo prove anche su dispositivi con risonatori aventi dimensioni mille volte più grandi, cioè dell'ordine di decine o centinaia di millimetri. A titolo di esempio, è  
30 stato effettuato un test su un dispositivo con risonatore in cui l'array è costituito da 9 celle unitarie di dimensioni  $D = 15$  mm, con una legge di graduazione lineare per le lunghezze dei risonatori, da 16,75 mm a 27,75 mm, con un angolo di graduazione di circa  $5,2^\circ$ . Il test ha fornito risultati di raccolta molto buoni.

## RIVENDICAZIONI

1. Un dispositivo risonatore (1) che comprende  
una guida d'onda (2) per la propagazione di un'onda meccanica,  
un array graduato di risonatori a sbalzo (4) disposti su un lato della guida d'onda,  
5 in cui ogni risonatore dell'array comprende uno strato di sostegno (40) che sostiene un elemento piezoelettrico (41),  
caratterizzato dal fatto che  
la guida d'onda (2) è di forma laminare e ha lo stesso spessore degli strati di supporto dei risonatori (40), e  
10 dal fatto che due estremità della guida d'onda (2) sono collegate ciascuna ad un rispettivo elemento di sostegno (3) sollevando la guida d'onda (2) rispetto ad un piano inferiore e permettendo alla guida d'onda di oscillare in un piano ortogonale ad un piano che comprende una faccia principale della guida d'onda.
2. Il dispositivo risonatore (1) della rivendicazione 1, in cui le lunghezze dei  
15 risonatori a sbalzo (4) sono graduate secondo una linea retta (7) inclinata di un angolo  $\theta$ , rispetto ad un asse longitudinale della guida d'onda, che è compreso preferibilmente fra  $3^\circ$  e  $7^\circ$  e più preferibilmente è  $5,2^\circ$ .
3. Il dispositivo risonatore (1) della rivendicazione 1 o 2, comprendente inoltre  
20 un secondo array graduato di risonatori a sbalzo, detto secondo array graduato di risonatori a sbalzo essendo identico a detto array graduato di risonatori a sbalzo ed essendo disposto su un secondo lato della guida d'onda opposto all'array graduato.
4. Il dispositivo risonatore (1) della rivendicazione 1 o 2 o 3, in cui la guida d'onda (2) e gli strati di supporto (40) dei risonatori sono fatti di un unico pezzo.
- 25 5. Il dispositivo risonatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, dove lo strato di supporto (40) di ogni risonatore a sbalzo (4) è di forma laminare e dove l'elemento piezoelettrico (41) è di forma laminare ed è disposto su una faccia principale dello strato di supporto (40).
6. Sistema di raccolta energia (100) comprendente un dispositivo risonatore (1)  
30 secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-5 e mezzi di stoccaggio (101) collegati elettricamente agli elementi piezoelettrici (41) dei risonatori per immagazzinare energia elettrica generata dagli elementi piezoelettrici quando la

guida d'onda (2) oscilla.

7. Sistema di raccolta energia (100) secondo la rivendicazione 6, ulteriormente comprendente un'interfaccia elettrica (104) che permette l'accesso all'energia immagazzinata nei mezzi di stoccaggio (101).

5 8. Metodo per la raccolta di energia con un sistema di raccolta secondo la rivendicazione 6 o 7, dove gli elementi di supporto (3) del dispositivo risonatore (1) sono collegati ad una superficie di supporto e dove la guida d'onda (2) è orientata in modo tale che un'onda flessionale, causata dalla vibrazione della  
10 superficie di supporto, si propaga nella guida d'onda (2) in una direzione che va dal risonatore di lunghezza inferiore al risonatore di lunghezza maggiore.

9. Metodo secondo la rivendicazione 8, dove gli elementi di supporto (3) sono travi e dove le estremità di ogni trave sono collegate alla superficie di supporto.

10. Sistema di azionamento (1000) comprendente un dispositivo risonatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-5.

15 11. Sistema di azionamento secondo la rivendicazione 10, ulteriormente comprendente un generatore di segnale elettrico (130) e un'unità di controllo (131), in cui il generatore di segnale elettrico (130) è collegato elettricamente agli strati piezoelettrici dei risonatori (41) ed in cui l'unità di controllo (131) è collegata operativamente al generatore di segnale elettrico (130) e adatta a controllarlo per  
20 generare un segnale elettrico ad una frequenza predeterminata, causando così l'oscillazione di almeno un risonatore (4) avente frequenza di risonanza uguale alla frequenza predeterminata.

12. Sistema di azionamento secondo la rivendicazione 10, ulteriormente comprendente un vibratore accoppiato meccanicamente a uno degli elementi di  
25 supporto, in particolare a quello più vicino al più corto dei risonatori a sbalzo, il vibratore essendo adatto a generare onde di flessione all'interno della guida d'onda a frequenze corrispondenti alle frequenze di risonanza dei risonatori a sbalzo.

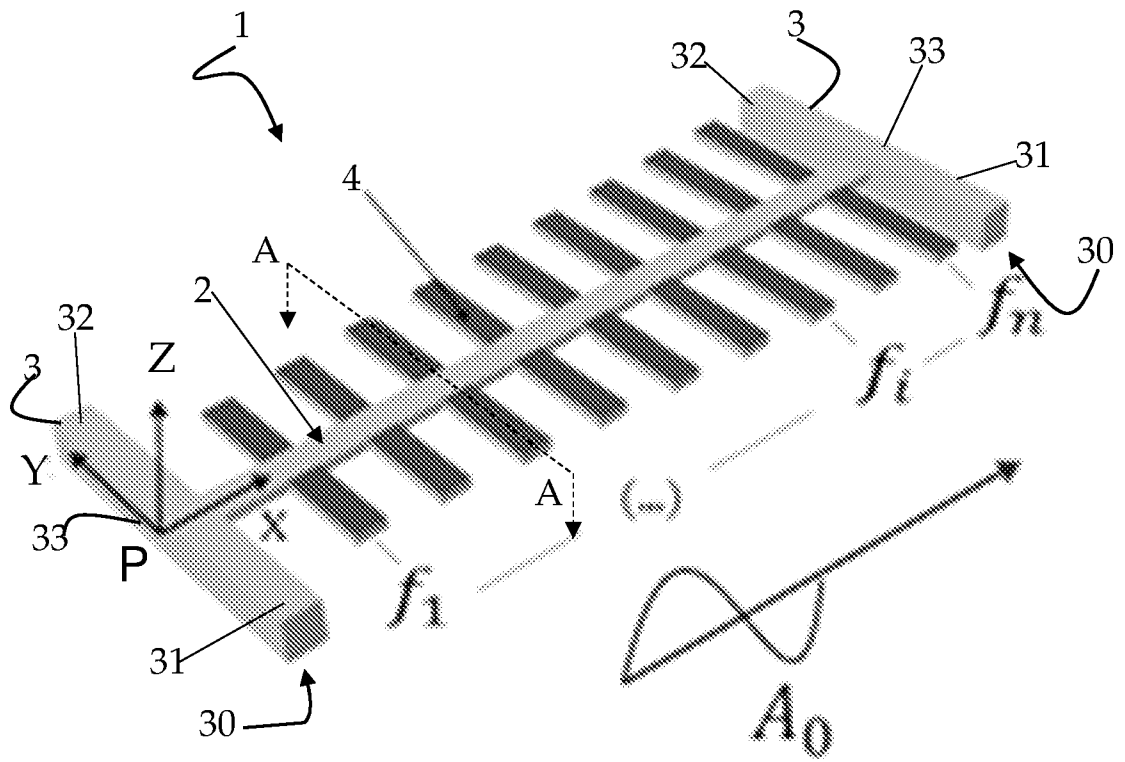


FIG. 1

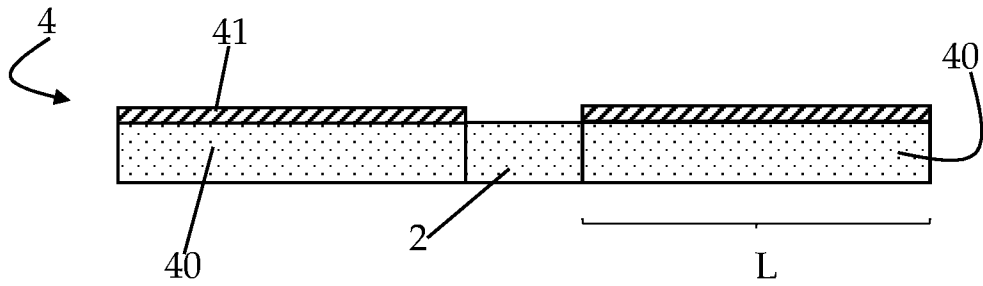


FIG. 2

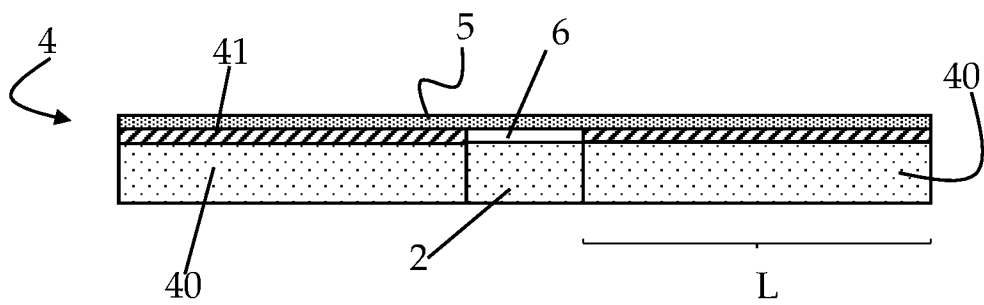


FIG. 3

FIG. 6b

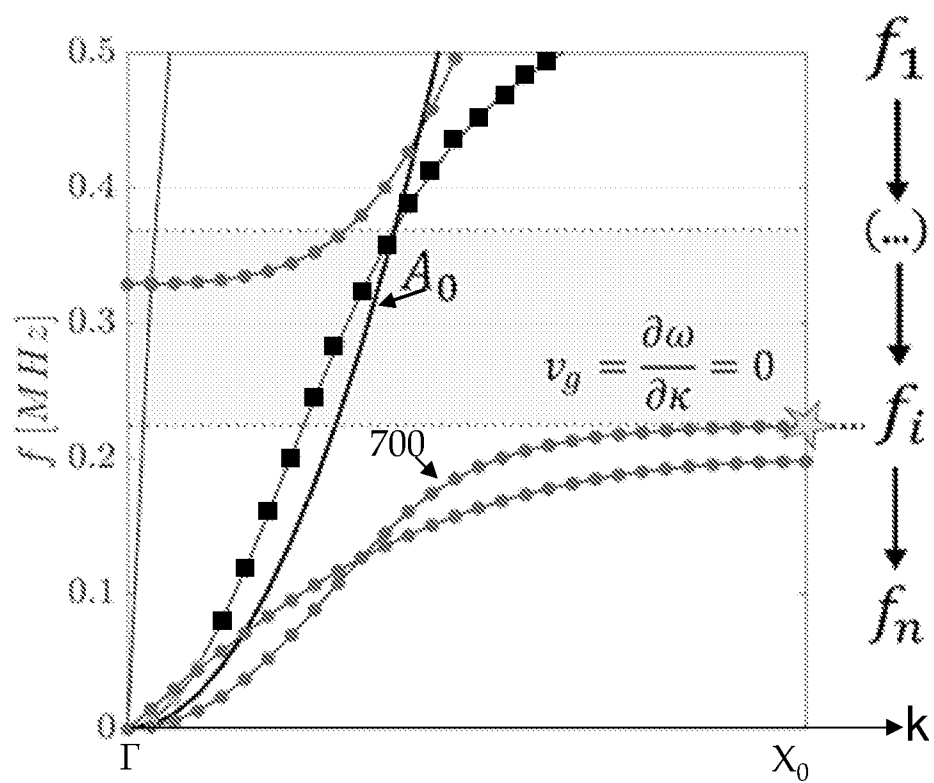


FIG. 7

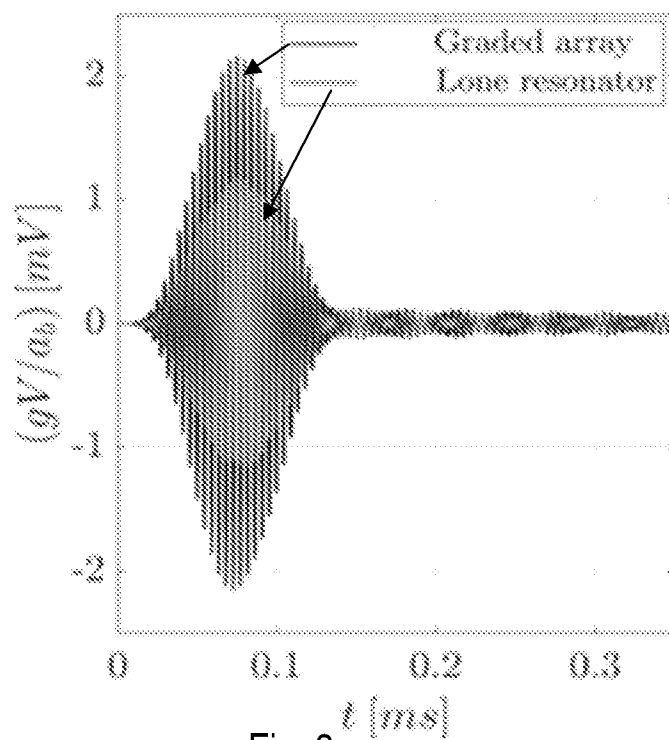
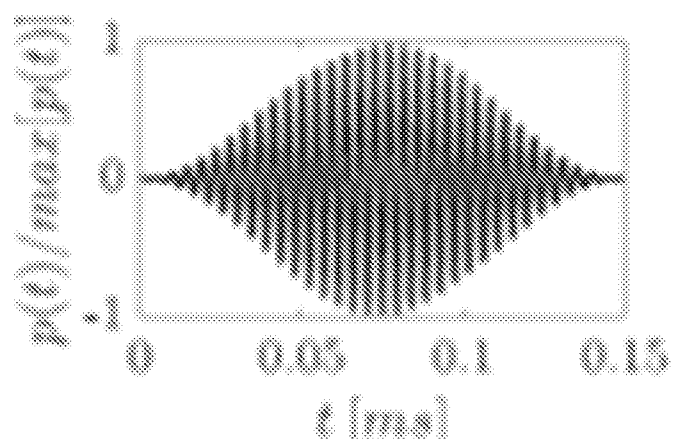
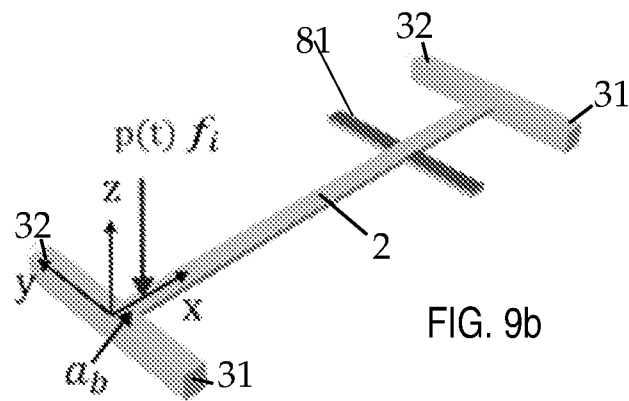
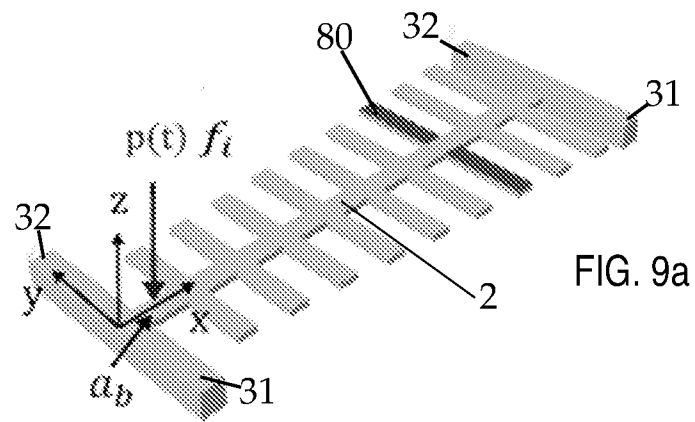


Fig. 8





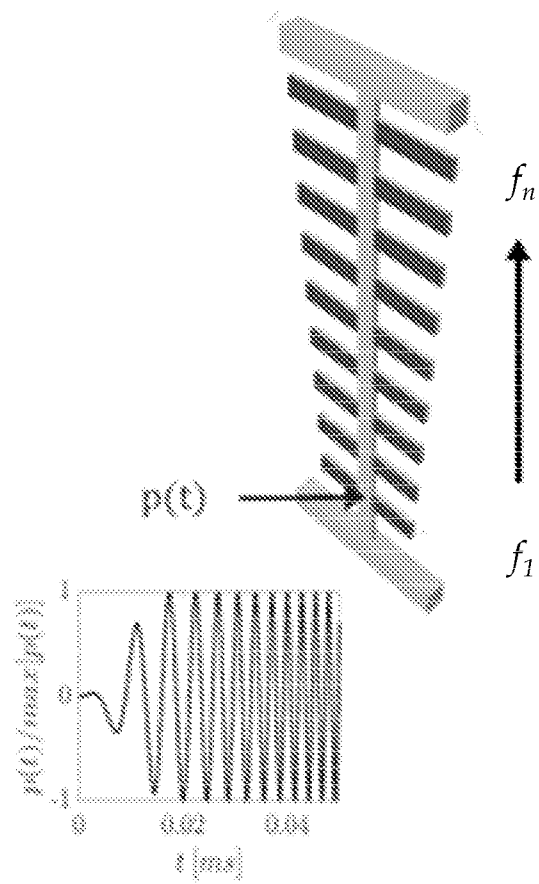


FIG. 11

