

Mekaniske bølgeledere til informationsoverførsel

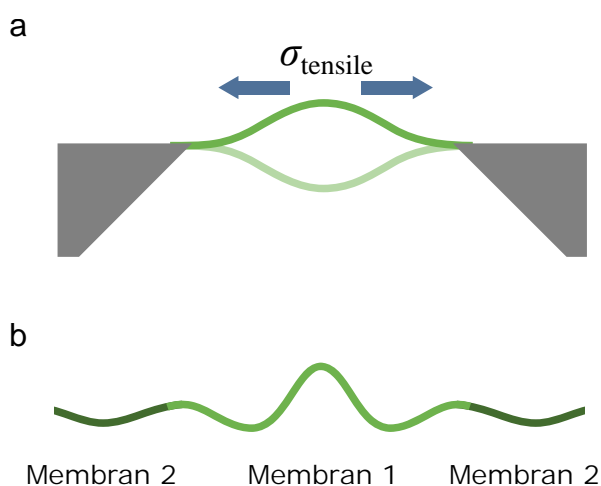
Ilia Chernobrovkin, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Artiklen beskriver udviklingen af en mekanisk bølgeleder på en chip, som kan transportere vibrationer næsten uden tab af energi. Ved at kombinere teknikker som dissipation dilution og soft clamping skabes ultrakoherente membraner, hvor friktion og bøjning minimeres. Inspireret af krystalstruktur og topologi konstrueres en fononisk krystal med en defekt, som leder mekaniske bølger langs en topologisk kanttilstand. Målinger viser ekstremt lave tab: ca. 3 dB/km og kun 0,01 % spredning ved hvert hjørne. Resultatet demonstrerer mekaniske bølgeledere med ydeevne på niveau med optiske fibre og åbner for nye teknologiske muligheder.

Mekaniske forbindelser

Når det kommer til praktiske anvendelser, har ethvert fysisk system sine fordele og ulemper. Det gælder også informationsoverførsel og beregning. I løbet af de sidste årtier har det teknologiske landskab fundet frem til to hovedmidler, der muliggør hurtig og effektiv transport: elektricitet og lys.

Der findes dog en anden måde at sende signaler på. Lyd eller, mere generelt, mekaniske bølger kan også bruges til at overføre energi og information. Man kunne argumentere for, at denne metode i dag er stort set forældet. Mekanisk energi kan let forringes, og dens udbredelseshastighed er mange størrelsesordener lavere end elektromagnetiske felter og elektriske strømme. Men den har en afgørende egenskab: Den kan effektivt kobles sammen med optiske og elektriske enheder. Sådanne mekaniske forbindelser kan potentielt formidle signaloverførsel fra en type system til en anden næsten uden tab. Og i skalaer med små computerchips betyder overgangshastigheden ikke så meget.



Figur 1. Skitser af de grundlæggende ideer bag (a) dissipation dilution og (b) soft clamping.

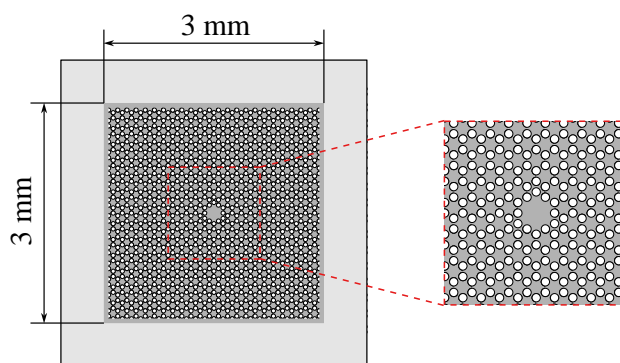
Dette bringer os til problemstillingen. Vi søger at udvikle en rent mekanisk enhed, der kan overføre et signal fra et punkt til et andet langs en bestemt bane uden tab af information. Vi designer en enhed med sådanne særlige egenskaber ved at kombinere mange forskellige ideer, der stammer fra forskellige områder inden for

fysik og ingeniørvidenskab, hvilket gør resultatet til et spændende og tværfagligt projekt.

Krystaller til fononer

Vi finder, at den mest egnede platform til at realisere en mekanisk bølgeleder synes at være en tynd firkantet membran. Man kan forestille sig den som en tromme. Når nogen slår på den, begynder den at vibrere, og vibrationerne producerer en lyd. Den lyd kan indeholde information, som uundgåeligt går tabt, så snart trommen bliver stille igen. Derfor søger vi at designe en membran, der kan vibrere så længe som muligt.

Som i mange andre mekaniske systemer lækker vibrationsenergien gennem friktion. Man kan forestille sig, at membranen består af mange sammenkoblede dele. Ideelt set bør de andre dele følge med, når vi trækker i en del. Desværre er det ikke tilfældet i virkelige systemer. Når nogle dele af membranen reagerer langsommere end andre, opstår der stor friktion mellem dem. Og ligesom ski, der glider hen over en snedække, til sidst stopper, så gør membranens bevægelse det også.



Figur 2. Skitse af en membran (mørkegrå) fastspændt til et bulk-substrat (lysegrå). Zoomet område taget omkring den centrale "defekte" pude. Hvide cirkler repræsenterer huller.

Denne friktion opstår hovedsageligt ved bøjning og forlængelse af membranmaterialet, og vi har udviklet specifikke teknikker til at håndtere begge dele [1].

Forlængelse kan mindskes ved at påføre en trækbelastning og strække membranen i alle retninger. Ligesom trommemembranen ville producere en ringende lyd, hvis den blev trukket hårdere på skallen, så vil vores membran også gøre det. Denne teknik kaldes "dissipation dilution" i faglitteraturen og henviser til det faktum, at en stor, jævnt fordelt belastning modvirker

enhver lokal forlængelse, som membranen måtte opleve (figur 1a).

Der opstår normalt stor bøjning ved membranens kanter, fordi den stærke binding til fastspændingsrammen forhindrer den i at vibrere frit. Hovedprincippet i teknikken kaldet "soft clamping" stammer fra ideen om, at hvis denne membran fastspændes til en anden, afskærmende membran, vil den sidstnævnte følge den førstnævntes vibrationsmønster (figur 1b). På den måde opstår der ingen overdreven bøjning.

Den fysiske realisering af blødt fastspændte membraner er i høj grad inspireret af kondenseret stoffysik (figur 2). Dette felt beskæftiger sig primært med periodiske strukturer, der kaldes krystaller. Teorien siger, at hvis et perfekt krystal har en defekt indeni, bliver de elektroner, der befinder sig der, lokaliserede og udveksler ikke energi med resten af materialet.

Analogien til elektroner i kvantemekanikken kaldes en fonon. Hvis man perforerer et periodisk mønster af huller i membranen, fungerer det nøjagtigt som en fast krystal for elektroner, men i dette tilfælde påvirkes fononerne. Hvis man laver en defekt i membranen, der bryder denne periodicitet, giver det anledning til specielle mekaniske vibrationsmønstre, der kun findes i det pågældende område [2].

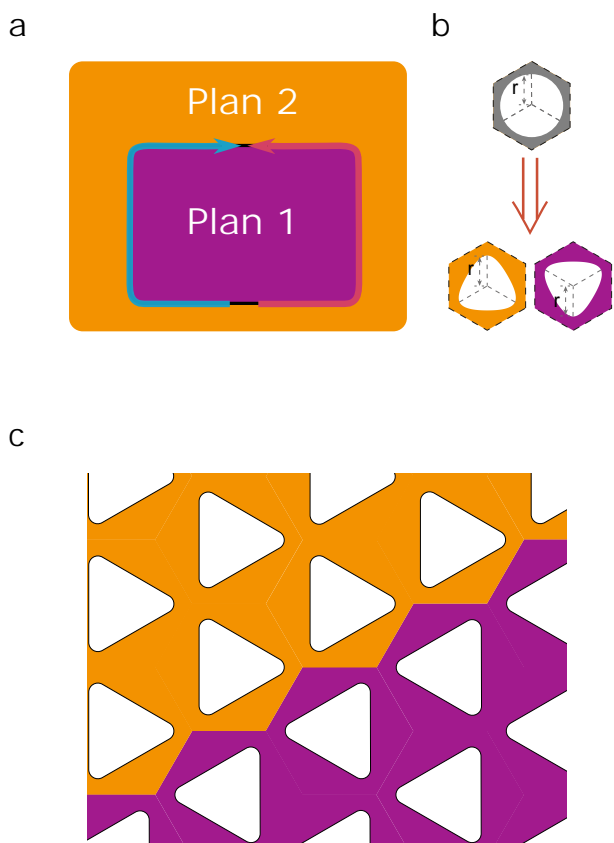
og antage forskellige former. Vi kan altid gendanne papirets oprindelige tilstand ved at folde det ud igen. Det betyder, at vi kun har udført glatte transformationer, som bevarer papirets egenskaber og blot ændrer dets udseende.

Hvis vi laver et hul et eller andet sted i arket, kan vi ikke længere gendanne papirets oprindelige tilstand ved at folde og folde det ud. Og medmindre vi ønsker at stirre på et gabende hul, er antallet af mulige former, som papiret kan antage, mens det stadig ser helt ud, betydeligt reduceret.

Det felt, der beskæftiger sig med overfladers egenskaber, kaldes topologi. Det er interessant på grund af dets forudsigelser om eksotiske egenskaber, som nogle overflader kan få ved at modificere dem direkte [3]. Vi låner de grundlæggende principper fra topologiske isolatorer, som er en specifik type todimensionelt fast stof, der kun tillader signaler at udbrede sig langs kanten. Vi kan bygge en bølgeleder ved at sammenkoble to isolatorer side om side (figur 3a). Ydeevnen af en sådan konfiguration maksimeres, når de to plane isolatorer er spejlbilleder af hinanden.

Lad os tage et enkelt element fra vores fononiske krystal, som kaldes en enhedscelle. Den er repræsenteret af en sekskant med et cirkulært hul indeni. Denne form har i sig selv en seksfoldig rotationssymmetri omkring sit centrale punkt. Men hvis vi laver et trekantet hul i stedet for et cirkulært, har den resulterende konfiguration kun en tredobbelt symmetri. Hvis vi spejler denne form, får vi en anden enhedscelle (figur 3b).

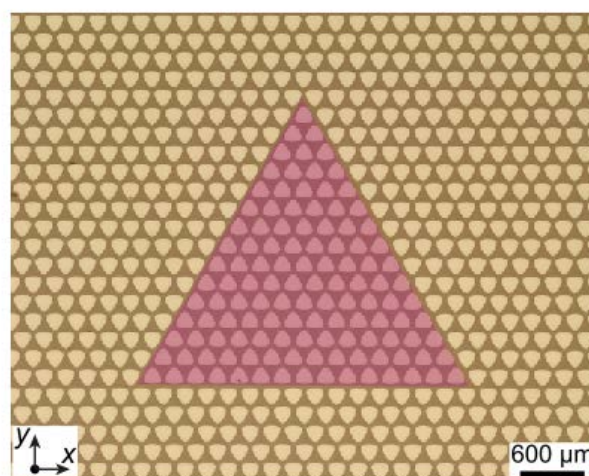
Der opstår et interessant fænomen, hvis vi bygger to krystaller med to forskellige tredobbelte symmetriske enhedsceller og forbinder dem (figur 3, c). Ved grænsen mellem dem finder vi en bølgeleder, der understøtter bølger, der udbreder sig langs den. Disse såkaldte topologiske kanttilstande opstår på grund af symmetrierne i de omgivende bulk-krystaller. Og fordi vi ikke længere har spejlsymmetrien, undertrykkes spredningen af disse bølger i princippet. Dette giver topologiske bølgeledere potentiale til at overføre energi og information stort set uden tab.



Figur 3. (a) Grundlæggende idé bag topologisk bølgeleder; (b) transformation af en fononisk krystalcelle for to forskellige dele af membranen; (c) sektion af grænsefladen mellem to topologisk forskellige dele af membranen.

Topologiske kanttilstande

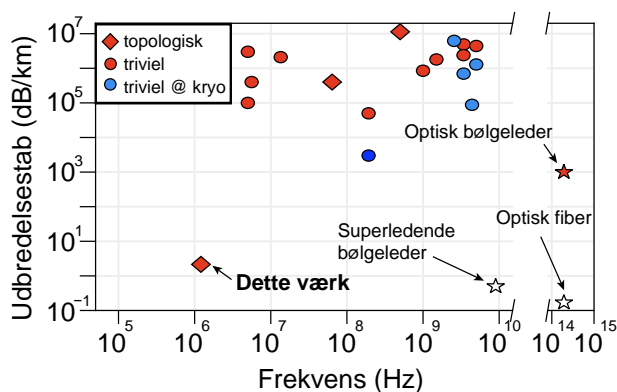
Forestil dig et fladt ark papir, der fx bruges til at lave origami-figurer. Det kan foldes på mange måder



Figur 4. Mikroskopbillede af den centrale del af den topologiske bølgeleder. To forskellige krystaller er fremhævet med farve.

Næsten tabsfrie bølgeledere

Vi kombinerer både maskinteknik og topologiske bølgelederprincipper i den enhed, der er afbildet i figur 4. Vi har modelleret bølgelederen i form af en stor trekant, fordi denne konfiguration giver os et direkte bevis på, hvordan skarpe hjørner påvirker bølgeudbredelsen.



Figur 5. Statistikker over udbredelsestab rapporteret i litteraturen for topologiske (romber) og trivielle (cirkler) mekaniske bølgeledere sammenlignet med avancerede platforme (stjerner) og den værdi, der er opnået i vores arbejde.

Man kan huske, at Newtons anden lov giver os definitionen på resonansmodi, der gør mekaniske oscillatorer mere følsomme over for kræfter ved bestemte frekvenser. I vores tilfælde er de manifestationen af de vandrende bølger, der arver information om tab og spredning. Vi kan opnå det første ved blot at observere, hvordan resonansvibrationer forsvinder. Og det sidste får en resonansmodus til at splitte sig i to, hvilket tyder på energiudveksling mellem to modsat udbredende bølger i bølgelederen.

Ved at foretage målinger på en sådan enhed får vi to vigtige resultater [4]. For det første finder vi ud af, at resonansvibrationernes forfaldshastighed er ca. 3 dB/km. Med andre ord, hvis vi sender en bølge ind i bølgelederen, mister den halvdelen af sin energi efter at have bevæget sig en kilometer. For det andet konkluderer vi, at i gennemsnit kun 0,01 % af bølgeenergien

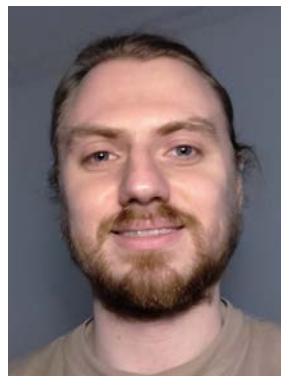
spredes ved hvert hjørne.

Tilsammen viser disse resultater os hidtil usete muligheder, når det gælder transport af signaler ved hjælp af mekaniske midler. Med hensyn til ydeevne kan vores enhed måle sig med industrielt fremstillede optiske fibre, der driver internettet og kommunikation, og den overgår alle andre mekaniske bølgelederkonstruktioner med flere størrelsesordener (figur 5).

Selvom vores platform endnu ikke har nogen praktisk anvendelse, viser den, at en tværfaglig tilgang, der kombinerer mange forskellige koncepter, kan føre til interessante og unikke effekter, der kan give anledning til yderligere forskning inden for fysik og teknologi.

Litteratur

- [1] S. Schmid, L. Guillermo Villanueva og M. L. Roukes (2023) "Fundamentals of Nanomechanical Resonators". Springer International Publishing.
- [2] Y. Taturyan, A. Barg, E. S. Polzik og A. Schliesser (2017) "Ultraslow nanomechanical resonators via soft clamping and dissipation dilution", *Nature Nanotechnology*, bind 12, side 776–783.
- [3] M. Nakahara (2003) "Geometry, topology, and physics", Graduate student series in physics, Institute of Physics Publishing, 2. udg.
- [4] X. Xi m.fl. (2025) "A soft-clamped topological waveguide for phonons", *Nature*, bind 642, side 947–953



Ilia Chernobrovkin er ph.d. fra kvanteoptiksektionen ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Hans forskningsområder omfatter kvanteoptomekanik, faststoffysik og topologi.



Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Neutronstjerner afslører nye grænser for en mulig femte kraft

PARTIKELFYSIK. Vi kender de fire fundamentale kræfter: den elektromagnetiske kraft, tyngdekraften og den stærke og svage kernekraft. Men nogle teorier inden for partikelfysik siger, at der måske findes en femte kraft. Nu har forskere fra bl.a. Tyskland og Italien undersøgt, om de ekstremt tætte stjerner, der kaldes neutronstjerner, kan hjælpe os med at finde en mulig – endnu ukendt – femte kraft i universet.

Forskerne har undersøgt eksistensen af en femte

kraft gennem afkølingen af neutronstjerner. Neutronstjerner er ekstremt tætte stjerne rester (efter en supernovaeksplosion kan en stjerne blive til en neutronstjerne), og de består primært af nukleoner, dvs. protoner og neutroner. Neutronstjerner køler i de første mange år primært via neutrinoer, og først senere dominerer foton/varmestråling fra overfladen.

Ligesom de andre kræfter virker gennem vekselvirkningen af en fundamental partikel – fotoner for elektromagnetismen, gluoner for den stærke kernekraft, de såkaldte W- og Z-bosoner for den svage kernekraft