



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Enabling quantum optomechanics for phononic crystals and superfluid helium films

Wei, X.

Citation

Wei, X. (2026, September 8). *Enabling quantum optomechanics for phononic crystals and superfluid helium films*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4309245>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4309245>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

Het meetpostulaat van de kwantummechanica is essentieel voor de kwantuminformatiewetenschap, bijvoorbeeld omdat het kwantumcryptografie en kwantumfoutcorrectie mogelijk maakt. Om het concept van een kwantummeting, dat een overgang vormt van de kwantumwereld naar de klassieke wereld, experimenteel te onderzoeken, richten wij ons op superposities van macroscopische objecten.

In dit proefschrift presenteren wij twee experimenten in de cavity-optomechanica, waarin licht wordt gebruikt om de beweging van macroscopische mechanische systemen te meten en te controleren. Het eerste experiment koppelt een siliciumnitridemembraan aan een Fabry-Pérot-holte en heeft tot doel een vaste mechanische resonator dichter bij het kwantumregime te brengen. Het tweede experiment koppelt een optische ringresonator aan een dunne film van supervloeibaar helium en onderzoekt niet-lineaire collectieve dynamica. In beide systemen verschuift mechanische beweging de resonantiefrequentie van een optische resonator terwijl het veld in de resonator terugwerkt op de mechanische vrijheidsgraden.

Deel I van dit proefschrift beschrijft de ontwikkeling van een cryogeen membrane-in-the-middle-experiment. Het doel was een siliciumnitridemembraan af te koelen tot dicht bij zijn mechanische grondtoestand en de fononbezetting ervan te verifiëren door afzonderlijke Stokes- en anti-Stokes-verstrooiing te detecteren. Hiervoor waren drie kerncomponenten nodig: opgeloste zijband-koeling van het membraan, sterke optische filtering van het optische aandrijfveld, en enkel-fotondetectie met hoge efficiëntie en lage achtergrondruis.

Na een algemene inleiding in hoofdstuk 1 beschrijft hoofdstuk 2 de installatie en karakterisering van het enkel-fotondetectiesysteem. Vier supergeleidende enkel-fotondetectoren op basis van wolfraamsilicide-nanodraden werden geïnstalleerd op de 1 K-plaat van de mengkoelmachine. Optische en elektrische afscherming verminderden achtergrondtellingen en interferentie, en de hoogst gemeten systeemdetectie-efficiëntie

bedroeg ongeveer 94% bij 1064 nm. Deze resultaten toonden aan dat de detectoren geschikt waren voor het meten van de zwakke velden die door optomechanische verstrooiing worden gegenereerd.

Hoofdstuk 3 presenteert het optische filtersysteem dat werd ontwikkeld om de bewegingszijbanden van de aandrijfaser te isoleren. Vier Fabry-Pérot-resonatoren werden in serie geschakeld en gestabiliseerd met behulp van een op reflectie gebaseerd resonatorstabilisatie schema. Het volledige systeem bereikte een totale optische transmissie van ongeveer 40%, samen met een berekende onderdrukking van de pomplaser van ongeveer 140 dB bij een frequentieverschuiving van 1 MHz. De filterresonatoren en SNSPD's vormden daarmee de belangrijkste infrastructuur die nodig was voor fotontelling van de Stokes- en anti-Stokes-zijbanden.

Hoofdstuk 4 beschrijft het cryogene membrane-in-the-middle-experiment zelf. Een siliciumnitridemembraan met hoge trekspanning en een fononische bandgapstructuur werd in een Fabry-Pérot-resonator geplaatst en in een mengkoelmachine afgekoeld tot 90 mK. De fononische structuur sluit de mechanische modus op en vermindert de koppeling ervan aan het ondersteunende frame, waardoor mechanische dissipatie wordt onderdrukt. De optische resonator met het membraan in het midden werd op de mengkamer gemonteerd en mechanisch geïsoleerd van trillingen van de pulse tube, waardoor stabiele optische toegang werd verkregen tot een mechanische modus rond 1 MHz.

De verplaatsing van het membraan moduleert de optische resonantie en genereert bewegingszijbanden rond de aandrijfaser. In het resolved-sideband-regime versterkt rood-ontstemd aandrijven de anti-Stokes-verstrooiing en koelt het de mechanische modus, terwijl blauw-ontstemd aandrijven de Stokes-verstrooiing versterkt en de beweging versterkt. Heterodynmetingen lieten het verwachte koel- en verhittingsgedrag zien wanneer de laserontstemming en het optische vermogen werden gevarieerd. Bij het hoogste bruikbare optische koelvermogen kwam het gekalibreerde mechanische spectrum overeen met een gemiddelde fononbezetting van ongeveer $\bar{n}_m \approx 10$.

De laatste stap was het combineren van het gekoelde membraan, de filterresonatoren en de SNSPD's in een meting van de Stokes- en anti-Stokes-fotonrates. Dit zou een onafhankelijke bepaling van de mechanische bezetting hebben opgeleverd en een directe test van de benadering van het membraan tot het kwantumregime. Stofverontreiniging als gevolg van renovatiewerkzaamheden in een aangrenzend laboratorium tastte echter het membraan en de cryogene optische resonator aan. De afzonderlijke componenten werden daarom apart aangetoond, terwijl de geplande enkel-fotonzijbandmeting een natuurlijke vervolgstap blijft.

Deel II van dit proefschrift bestudeert een dunne film van supervloeibaar helium op een optische ringresonator met een diameter van ongeveer 6 mm. Dikte-oscillaties van de film vormen third-sound-modi, waarvan de herstellende kracht hoofdzakelijk wordt bepaald door de interactie tussen helium en substraat. Doordat het optische evanescente veld overlapt met de film, verschuiven deze dikteveranderingen de optische resonantie en kan de collectieve beweging van de film optisch worden uitgelezen.

In tegenstelling tot het membraanexperiment werd de supervloeibare film voor- namelijk aangedreven via een fotothermische reactie op het intracavitaire optische vermogen. Deze verhitting verandert het thermodynamische evenwicht van de film en drijft supervloeibare stroming aan, waardoor de filmdikte wordt herverdeeld. De resulterende dikteverandering verschuift de resonantie van de holte, wat het optische vermogen in de resonator, en daarmee de verdeling van de verhitting, wijzigt. Deze terugkoppeling tussen optisch vermogen, temperatuur, filmdikte en ontstemming biedt een natuurlijke route naar niet-lineaire dynamica.

Bij laag optisch vermogen lieten metingen bij verschillende filmdiktes goed gedefinieerde collectieve modi zien. Naarmate het vermogen werd verhoogd, nam de dominante oscillatiefrequentie af en schakelde deze vervolgens over naar een toestand met lagere frequentie. Bij sterkere aandrijving verschenen subharmonische excitaties nabij de helft van de oorspronkelijke frequentie, wat wijst op het begin van periodeverdubbelingsgedrag. Bij nog hogere vermogens kwam de film in een chaotische toestand terecht, met aanhoudende onregelmatige beweging gedurende meerdere minuten. Het experiment toont daarmee een ontwikkeling aan van regelmatige third-sound-oscillaties naar frequentieschakeling, periodeverdubbeling en chaos in een optisch aangedreven supervloeibare film.

De metingen identificeren geen enkelvoudig mechanisme voor elke overgang. De waargenomen dynamica komt waarschijnlijk voort uit gekoppelde optische, thermische en hydrodynamische effecten: optische verhitting wijzigt de filmdikte, supervloeibare stroming herverdeelt de film, vertraagde thermische relaxatie levert terugkoppeling, en koppeling tussen third-sound-modi kan extra vrijheidsgraden introduceren. Dikte-oscillaties met grote amplitude kunnen eveneens bijdragen via de intrinsieke dikteafhankelijkheid van de third-sound-frequentie.

Voor het membraanexperiment is de volgende stap het herhalen van de koelmeting met een schoon membraan en het combineren daarvan met de reeds aangetoonde filter- en fotontelsystemen. Het meten van Stokes- en anti-Stokes-verstrooiingsrates zou de mechanische bezetting onafhankelijk kalibreren en de gevoeligheid voor afzonderlijke fononen testen. Op deze manier kan een goed gedefinieerde toestand met lage

fononbezetting worden voorbereid, die vervolgens kan worden gemanipuleerd tot een macroscopische superpositietoestand.

Voor het supervloeistofexperiment onthullen de metingen rijke niet-lineaire dynamica, waaronder frequentieschakeling, periodeverdubbeling en chaos. Toekomstig werk zou deze waarnemingen kunnen uitbreiden tot een vollediger dynamische kaart, waarbij een preciezere controle over optisch vermogen, ontstemming, temperatuur en filmdikte wordt gebruikt om de rollen van optische verhitte, vertraagde thermische terugkoppeling, supervloeibare stroming en moduskoppeling van elkaar te onderscheiden. Samen met kwantitatieve modellering zou dit de waargenomen niet-lineaire dynamica verbinden met het bredere potentieel van optisch gecontroleerde supervloeibare heliumfilms als platform voor het bestuderen van macroscopische kwantumvloeistoffen, van third-sound-excitatie en vortexdynamica tot precieze optomechanische metingen.