



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Optical cavities and quantum emitters

Koks, C.

### Citation

Koks, C. (2024, January 25). *Optical cavities and quantum emitters. Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3715075>

Version: Publisher's Version

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

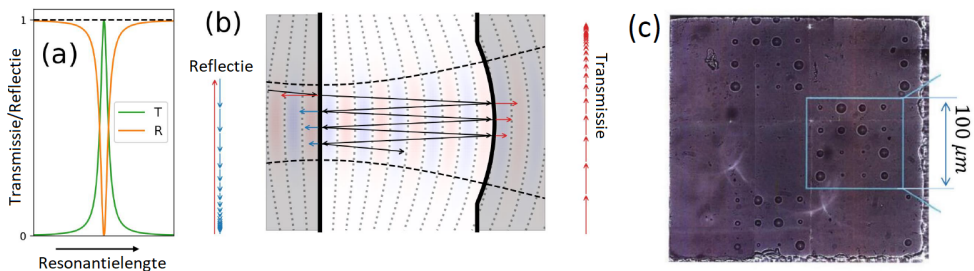
Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3715075>

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

# SAMENVATTING

Dit proefschrift beschrijft stappen richting het creëren van een goede lichtbron van enkele fotonen. Om dit te bereiken hebben we twee dingen nodig: een materiaal dat enkele fotonen uit kan zenden en een goede optische resonator om te koppelen met dit materiaal. Dit proefschrift richt zich voornamelijk op de studie van de microcavity resonator (hoofdstukken 2-6) en eindigt met een hoofdstuk over quantumstralers in hexagonaal Boron Nitride (hoofdstuk 7). De belangrijkste bevinding van dit proefschrift is dat goede optische resonatoren, d.w.z. die met veel reflecties en sterk gefocuste bundel, significante afwijkingen vertonen van de standaardtheorie van optische resonatoren. Deze afwijkingen worden in dit proefschrift grondig onderzocht.

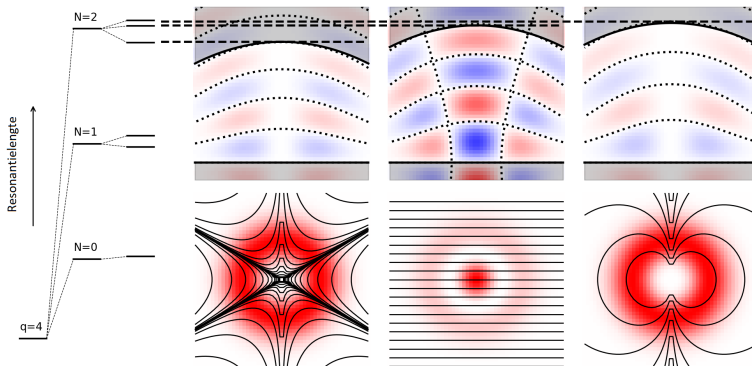
Figuren S.1a en S.1b illustreren het werkingsprincipe van de Fabry-Perot resonator. Twee sterk reflecterende spiegels zijn dicht bij elkaar geplaatst. Als we één spiegel nemen reflecteert deze bijna al het licht en wordt slechts een klein deel van het licht doorgelaten. De magie van de Fabry-Perot resonator is dat wanneer een tweede spiegel wordt toegevoegd, al het licht kan worden doorgelaten. Dit gebeurt wanneer het 3D lichtprofiel (ook wel “optische mode”) precies tussen de twee spiegels past, zoals het geval is in figuur S.1b. In dat geval, interfereren alle kleine fracties licht die door de tweede spiegel worden doorgelaten op constructieve wijze, zodanig dat de combinatie van twee spiegels voor deze resonantielengte volledig transparant is. Dit wordt in figuur S.1b schematisch geïllustreerd door de rode en blauwe pijlen met respectievelijk positieve en negatieve fasen. Al het licht aan de rechterkant van de twee spiegels heeft dezelfde fase en telt dus op. De aanvankelijk gereflecteerde straal aan de linkerkant is in antifase met al het doorgelaten licht door de linkerspiegel en komt samen op nul uit. Bij resonantie meten we dus een piek in transmissie en een dip in reflectie.



Figuur S.1: (a) Transmissie- en reflectiespectra van een ideale Fabry-Perot-resonator. Bij resonantie wordt al het licht doorgelaten en wordt er geen licht gereflecteerd. (b) Schets van een plano-concave Fabry-Perot-resonator. De twee ononderbroken zwarte lijnen tonen de spiegels, waarbij de rechterspiegel een microspiegel is met een kuiltje met een zeer kleine kromtestraal die de vorm van de golfvronten (stippellijnen) bepaalt. De pijlen schetsen de vele reflecties van het licht, waarbij blauw en rood in tegengestelde fase zijn. De gekleurde (licht blauw/rode) vlakken tonen de elektrische veldamplitude tussen de twee spiegels. De twee zwarte stippellijnen volgen de sterk uiteenlopende openingshoek van de mode. (c) Beeld van de microspiegels onder een microscoop. De cirkels zijn kuiltjes in de spiegel met kromtestralen  $R \sim 25 \mu\text{m}$  voor de grootste cirkels en  $R \sim 3 \mu\text{m}$  voor de kleinste cirkels.

Uit de spiegelafstand waarop de resonanties optreden en het veldprofiel van het doorgelaten licht, kunnen we de vorm van de optische mode heel nauwkeurig bepalen. De resonanties zijn gevoelig voor veranderingen van de spiegelafstand van 25 picometer, wat half zo groot is als een waterstofaatom. De vorm kan afwijken van de standaardtheorie wanneer de mode sterk gefocuseerd is en de openingshoek groot is. De afwijking wordt geïllustreerd door de discrepantie tussen het golffront (gestippelde curven) en de spiegel (ononderbroken bolvormige curve) in figuur S.1b. Deze grote openingshoeken zijn het gevolg van de zeer kleine kromtestraal van de microspiegels.

Figuur S.1c toont de microspiegels die in dit proefschrift zijn gebruikt. Deze microspiegels zijn gemaakt door Oxford HighQ (UK), waar ze met een gefocuseerde ionenbundel kleine kuiltjes in een glasplaatje maken, die ze vervolgens coaten met reflecterend materiaal. Deze kuiltjes hebben kromtestralen tussen 3 en 25  $\mu\text{m}$  en diameters tussen 2 en 10  $\mu\text{m}$ . Dit is even groot als sommige bacteriën, maar nog belangrijker, dit is de grootte van slechts een paar optische golflengten  $\lambda$ . Wanneer de kromtestraal van de spiegel slechts een paar golflengtes is (typisch  $R \lesssim 10\lambda$ ) is de conventionele paraxiale beschrijving van de optische modes niet meer correct en moet rekening worden gehouden met niet-paraxiale effecten.



Figuur S.2: Schematische weergave van niet-paraxiale effecten in het resonantiespectrum van een optische resonator. (links) Grafiek van fijnstructuursplitsingen, vergelijkbaar met die gevonden in tekstboeken over de quantummechanica. (rechts) Schetsen van drie optische modes van de  $N = 2$ . De bovenste rij toont hoe de staande golven van deze modes bij subtiel verschillende spiegelafstanden resoneren. De onderste rij toont de veldprofielen van de modes, waarbij de zwarte lijnen de lokale lineaire polarisatie weergeeft. De afbeeldingen zijn niet op schaal.

Figuur S.2 toont fijnstructuur in het resonantiespectrum van een optische resonator. De transversale modes met de aanduiding  $N = 1$  en  $N = 2$  splitsen zich op vanwege de onvermijdelijke niet-paraxiale effecten in de resonator. We noemen deze onvermijdelijke splitsing een “fijnstructuur”. De fijnstructuur is fundamenteel voor resonatoren met microspiegels, waarmee we bedoelen dat deze niet verdwijnt met een andere spiegelvorm. De ruimtelijke profielen in de lengte- en dwarsrichting voor de  $N = 2$  mode-groep worden rechts geïllustreerd in figuur S.2, waar de resonantielengte van elk van de drie modes enigszins verschilt. De drie modes hebben een duidelijke veldverdeling (rode en blauwe kleuren) en polarisatieprofiel (zwarte lijnen in de onderste figuur). De bloemachtige polarisatieprofielen van de linker- en rechtermode zijn een gevolg van de spin-

baankoppeling, die hun splitsing veroorzaakt. De centrale mode wordt niet beïnvloed door spin-baankoppeling, maar is in resonantielengte verschoven ten opzichte van het midden van de twee modes omdat deze reflecteert vanuit een ander deel van de spiegel.

De fijnstructuur wordt belangrijk in de resonantiespectra wanneer de finesse  $F$  groot is en de relatieve kromtestraal  $R/\lambda$  klein is. Andere effecten, zoals indringdiepte en het mengen van modes (mode-mixing), worden ook steeds belangrijker als  $F\lambda/R$  toeneemt. Niet geheel toevallig hebben optische resonatoren met een sterke interactie tussen licht en materie ook een grote factor  $F\lambda/R$ . De resonator die in de metingen van dit proefschrift wordt gebruikt, is een vrij standaard resonator en de literatuur vermeldt zelf resonatoren met en veel grotere factor  $F\lambda/R$ . Wij denken daarom dat veel van de in dit proefschrift beschreven effecten ook door andere onderzoeksgroepen moeten zijn waargenomen, maar daarover is niet in detail gerapporteerd. In dit proefschrift laten we metingen van deze concepten zien en bieden we bruikbare werkformules om de vele modes in de resonator te begrijpen en te gebruiken.

Dit proefschrift bestaat uit 7 hoofdstukken. Het begint met een inleidend hoofdstuk en gaat verder met 6 hoofdstukken waarvan de inhoud hieronder is samengevat.

**Hoofdstuk 2** analyseert hoe licht de sterk reflecterende DBR-spiegels binnendringt. Dit proces kan goed worden beschreven met drie indringdieptes. Welke van de drie indringdiepte moet worden gebruikt hangt af van het experiment dat wordt uitgevoerd. Ten eerste beschrijft de fase-indringdiepte de verschuiving van de knopen en buiken in of uit de DBR. Ten tweede bepaalt de frequentie-indringdiepte hoeveel een lichtpuls wordt vertraagd door de verschillende indringdieptes bij verschillende kleuren. Ten slotte geeft de modale indringdiepte de verschuiving van het brandpunt aan wanneer een straal op de spiegel wordt gefocusseerd. Het verschil tussen deze indringdiepten kan zo groot als een golflengte zijn, en dus is het belangrijk om hiermee rekening te houden bij het gebruik van microspiegels in de optische resonator. Onze analyse helpt andere onderzoekers bij het kiezen van de juiste indringdiepte om hun metingen te beschrijven.

**Hoofdstuk 3** toont metingen van het mengen van optische modes in de resonator. Deze mode-mixing vindt plaats wanneer een fundamentele mode en een transversale mode resoneren bij (bijna) dezelfde frequentie/spiegelafstand. Mode-mixing is een zeer wijdverspreid concept in de natuurkunde dat meestal wordt gemeten in het frequentiedomein. In plaats daarvan meten we mode-mixing via de veldprofielen van de eigenmodes, die ook mixen. Deze methode blijkt veel gevoeliger te zijn, zodat kleinere effecten die in het frequentiedomein niet zichtbaar zijn wel kunnen worden waargenomen in het profiel van de optische modes.

**Hoofdstuk 4** beschrijft een theorie om te berekenen hoe niet-paraxiale effecten een fijnstructuur in het resonatiespectrum creëren. De fijnstructuur kan in lengte- of frequentiescans worden waargenomen als een splitsing van resonanties die volgens de standaard paraxiale theorie ontaard zou moeten zijn. Het woord “fijnstructuur” komt uit de atomaire fysica, waar kleine splitsingen werden waargenomen die alleen verklaard konden worden door fundamentele (relativistische) correcties op de Schrödingervergelijking. De fijnstructuur van de microresonator kan alleen worden verklaard door fundamentele (niet-paraxiale) correcties op de paraxiale golfvergelijkingen. De fijnstructuur is onvermijdelijk wanneer microspiegels worden gebruikt, waarvoor we bruikbare werkformules bieden om de resonantiespectra volledig te beschrijven.

**Hoofdstuk 5** toont metingen van de fijnstructuur. We meten verschillende pieken die we zouden verwachten van de paraxiale theorie. Maar als we inzoomen op deze pieken, vinden we splitsingen die alleen kunnen worden beschreven door niet-paraxiale theorie. Met behulp van een polarisatie-gevoelige CCD-camera kunnen we elk van de modes een label geven en deze vergelijken met theoretische voorspellingen. We ontdekken dat de niet-paraxiale theorie de splitsingen nauwkeurig voorspelt. Deze bevindingen bevestigen het belang van niet-paraxiale correcties in optische resonatoren met microspiegels.

**Hoofdstuk 6** demonstreert alle hierboven genoemde concepten (indringdieptes, mode-mixing en fijnstructuur), maar nu met behulp van een lichtbron tussen de twee spiegels (fluorescerende nanodiamantjes) in plaats van een externe lichtbron zoals een laser of witte lamp. Met behulp van deze lichtbron kunnen we nauwkeurig de golflengte- en spiegel afstand-afhankelijkheid van alle optische resonanties meten. Het voordeel van deze methode is dat we nu de indringdiepte kunnen bepalen zonder afhankelijk te zijn van een ruwe schatting van de exacte spiegelafstand, en dat we nu de mode-mixing in het frequentiedomein kunnen bepalen. De spiegelafstand- en golflengte-afhankelijke intensiteitsplaatjes geven een rijk inzicht in het onverwachte gedrag van resonator.

**Hoofdstuk 7** toont metingen met een zelfgebouwde confocale microscoop aan quantumstralers in flakes van hexagonale Boron Nitride (hBN). We scannen de hBN-flake en meten veel fluorescerende centra. De meesten van hen stoppen snel met het uitzenden van licht, wat het moeilijk maakt om ze in detail te karakteriseren. Slechts enkele centra bleven enkele uren licht uitzenden. Voor deze centra zien we dat de excitatie- en emissiedipolen niet altijd dezelfde kant op wijzen en dat het uitgezonden licht soms tijdelijk uitdooft met twee verschillende, vermogensafhankelijke tijden. Onze waarnemingen kunnen worden gebruikt om de quantumstraler en zijn omgeving beter te identificeren.