



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Cavity quantum electrodynamics with quantum dots in microcavities

Bakker, M.P.

Citation

Bakker, M. P. (2015, June 17). *Cavity quantum electrodynamics with quantum dots in microcavities*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/33240>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/33240>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/33240> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Bakker, Morten

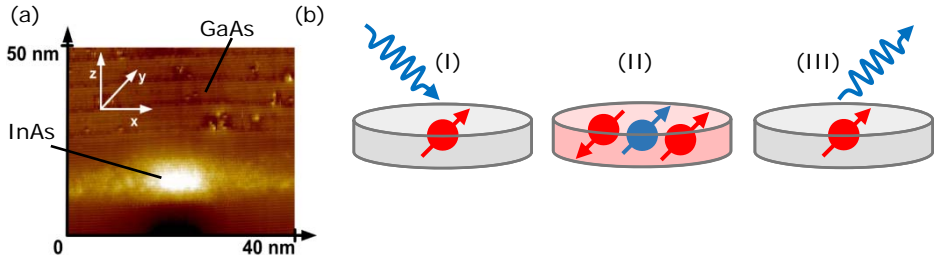
Title: Cavity quantum electrodynamics with quantum dots in microcavities

Issue Date: 2015-06-17

Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft onderzoek naar ‘quantum dots’ (QD’s, in het Nederlands vertaald als ‘kwantum punten’), in optische trilholttes. In deze samenvatting zal worden uitgelegd hoe QD’s en optische trilholttes werken, en wat samengevat de resultaten zijn die tijdens mijn promotieonderzoek behaald zijn en in dit proefschrift gepresenteerd worden.

QD’s zijn hele kleine 3D structuren van een halfgeleidermateriaal, Indium Arsenide (InAs), dat is omgeven door een ander halfgeleidermateriaal, Gallium Arsenide (GaAs). Figuur 9.7 (a) laat een elektronenmicroscop afbeelding van de doorsnede van een QD zien. Ze worden spontaan gevormd door eerst InAs op een GaAs substraat te deponeren, waardoor ‘druppeltjes’ ontstaan. Vervolgens worden deze InAs druppels weer met GaAs bedekt. QD’s bestaan uit slechts 10.000 – 100.000 afzonderlijke In en As atomen en hebben een pannenkoekachtige vorm met een diameter van ~ 40 nm (een nm is gelijk aan 10^{-9} meter) en een hoogte van 1 – 2 nm. InAs heeft als eigenschap dat ladingen die zich erin bevinden een lagere energie hebben dan ladingen in het omringende GaAs, en er dus niet zomaar uit kunnen wegspringen. Verder zijn QD’s optisch actief, wat inhoudt dat ze een lichtdeeltje, foton genaamd, kunnen absorberen en vervolgens kunnen uitzenden. Dit proces wordt schematisch weer gegeven in Fig. 9.7 (b). Deze optische overgangen zijn spectraal scherp, wat inhoudt



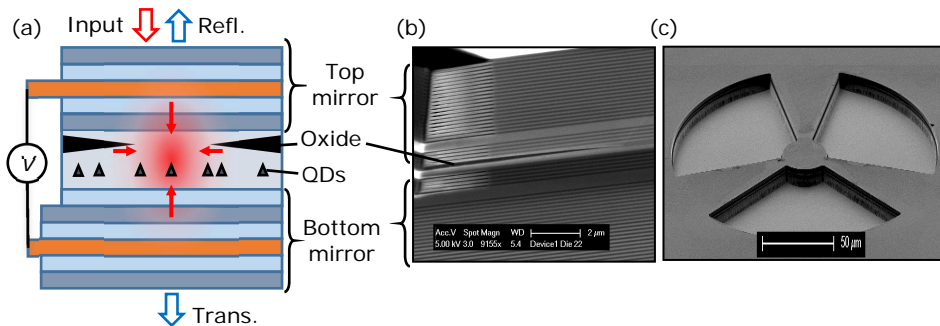
Figuur 9.7: (a) Elektronenmicroscop afbeelding van een InAs quantum dot (QD) die in een GaAs kristal is ingebouwd. (b) Schematische weergave van de absorptie en emissie van een foton door een QD geladen met een enkel elektron (rode bolletje). Een foton valt (I) op de QD, creëert (II) een elektron en elektrongat (blauw bolletje) paar, en wordt (III) vervolgens weer uitgezonden.

dat alleen fotonen met een bepaalde golflengte (oftewel kleur) een interactie kunnen aangaan; QD’s worden daarom ook wel kunstmatige atomen genoemd.

De QD’s worden door onze onderzoeksgroep zodanig in een structuur gegroeid, dat de totale lading in de QD gecontroleerd kan worden zo dat er slechts één enkel elektron in zit. Een opgesloten elektron gedraagt zich volgens de wetten van de

kwantummechanica en is interessant omdat het kan dienen als een bouwsteen voor een nieuw soort ‘kwantum’ computer. Deze zou gebruik kunnen maken van speciale kwantummechanische eigenschappen en hierdoor bepaalde berekeningen veel sneller kunnen uitvoeren dan een ‘klassieke’ computer. Verder is onderzoek naar QD’s gedreven door nieuwsgierigheid; omdat QD’s zich gedragen volgens de wetten van de kwantummechanica, is het een spannende uitdaging om te kijken in hoeverre voorspellingen van deze wetten ook daadwerkelijk in een laboratorium gemeten kunnen worden.

QD’s bestuderen, uitlezen, en met elkaar koppelen kan door middel van enkele fotonen. Echter, de interactie waarschijnlijkheid tussen licht en een QD is erg klein (typisch maar enkele procenten), evenals de kans dat een uitgezonden foton wordt opgevangen. Dit maakt experimenten erg lastig, maar ook met name toepassingen. De oplossing hiervoor is om hele kleine optische trilholttes te gebruiken (Engels: ‘microcavities’). Licht dat in de trilholtte valt en de juiste golflengte heeft waardoor het erin past, ‘stuitert’ in ons experiment gemiddeld ongeveer 2000 keer heen en weer, voordat het er doorheen gaat. We spreken dan van resonant licht of licht dat resonanceert in de trilholtte.



Figuur 9.8: Microscopische trilholtte (microcavity). (a) schematische weergave. Invallend licht (Input) wordt ingevangen tussen de top en bodem spiegels en wordt in de dwarsrichting opgesloten door de oxidelaag, voordat het reflecteert of transmittiert. Met elektrische contacten wordt een spanning V aangelegd om de lading in de QD’s te controleren. Elektronenmicroscop afbeeldingen van (b) een doorsnede en (c) een bovenaanzicht van de centrale pilaar (diameter $30 \mu\text{m}$).

Figuur 9.8 (a) toont een schematische afbeelding van een trilholtte en Figuur 9.8 (b,c) laten elektronenmicroscop afbeeldingen zien van een doorsnede en een bovenaanzicht. Zo’n trilholtte bestaat ten eerste uit twee spiegels waartussen licht kan worden opgesloten. Deze spiegels bestaan uit heel veel reflecterende lagen (bestaand uit GaAs en Al(Aluminium)GaAs) die gezamenlijk als een hele goede spiegel functioneren, met een typische reflectiviteit $> 99.95\%$. Om licht ook in het vlak tussen de spiegels op te sluiten, wordt er eerst een pillaartje geëtst, en wordt daarna een van de lagen in het midden van de pilaar geoxideerd. Omdat het oxide een lagere brekingsindex heeft dan het ongeoxideerde materiaal, en licht een hoog brekingsindex

materiaal prefereert, wordt op deze manier het licht tussen de twee spiegels en de oxide laag in een doosje opgesloten. De lengte van de oxide laag is essentieel; als de laag niet ver genoeg geoxideerd is dan is de trilholtte te groot en is de koppeling tussen QD's en licht niet sterk genoeg. Echter, als de laag te ver door geoxideerd is dan werken de elektrische contacten en daarmee de QD's niet.

Het bijzondere van een QD in een trilholtte is dat één enkele QD, die in de vrije ruimte slechts een kleine fractie van het licht kan absorberen, er voor kan zorgen dat een foton dat anders door de trilholtte zou worden doorgelaten, nu (bijna) volledig wordt gereflecteerd. Om de werking van dit proces uit te leggen, beginnen wij bij de interacties die tussen licht en materie kunnen plaatsvinden. In Figuur 9.9 (a) worden drie processen weer gegeven: (I) een invallend foton heeft geen interactie, (II) een foton wordt geabsorbeerd, de QD wordt aangeslagen, en een foton wordt na spontaan verval opnieuw uitgezonden, en (III) het foton wordt vertraagd door de QD en ondergaat een faseverandering, zonder dat het wordt geabsorbeerd. Dit laatste proces kan vergeleken worden met licht dat door glas valt: het licht wordt niet geabsorbeerd, maar 'voelt' wel de glas (SiO_2) moleculen en wordt daardoor vertraagd, een proces dat ook wel beschreven wordt met een brekingsindex.

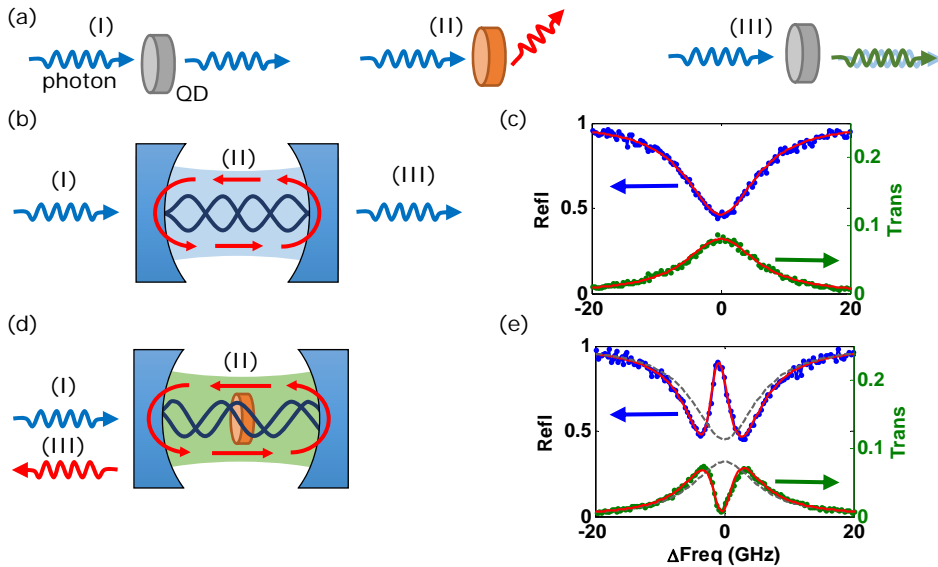
Figuur 9.9 (b) geeft schematisch het proces weer van licht dat op een lege trilholtte valt. Resonerend licht past een geheel aantal halve golflengtes in de trilholtte en wordt door constructieve interferentie getransmitteerd. Figuur 9.9 (c) laat de bijbehorende metingen zien: langs de horizontale as wordt de frequentie van het ingekoppelde licht veranderd, en langs de verticale as zien we dat de reflectie een minimum heeft en de transmissie een maximum bij de trilholtte resonantie ($\Delta f = 0$ GHz). Figuur 9.9 (d) toont wat er gebeurt als er één QD aan de trilholtte gekoppeld wordt. Een klein deel van het licht wordt nu geabsorbeerd, maar het meeste licht ondergaat een vertraging en faseverandering waardoor het niet meer in de trilholtte 'past'. Dit zorgt ervoor dat het licht niet langer door de trilholtte wordt getransmitteerd, maar in plaats daarvan gereflecteerd wordt. Metingen in Fig. 9.9 (e) laten dit effect zien en zijn een van de hoogtepunten van het werk dat wordt beschreven in dit proefschrift.

Dit proefschrift bestaat uit 9 hoofdstukken met ruwweg de volgende inhoud:

Hoofdstuk 1 is een algemene introductie van het onderzoeksveld. Een algemene motivatie wordt gepresenteerd en de belangrijkste theoretische concepten worden uitgelegd. Ook wordt een vergelijking gemaakt tussen de verschillende soorten experimentele systemen die zijn ontwikkeld om (kunstmatige) atomen aan fotonen in trilholttes te koppelen, inclusief ons systeem.

Hoofdstuk 2 is een meer technische introductie. Hierin worden details gegeven over de nieuwe cryostaat die ontwikkeld is tijdens mijn promotie, de optische meet-technieken, het ontwerpen en ontwikkelen van de samples, en metingen aan enkele QD's.

Hoofdstuk 3, 4 en 5 gaan over het optimaliseren van de oxidelaag, welke kritiek is voor het goed functioneren van de trilholttes. In Hoofdstuk 3 wordt een techniek gepresenteerd waarmee het oxidatieproces bijna in real time gevolgd kan worden. In Hoofdstuk 4 wordt aangetoond dat de oxidatie ook gecontroleerd in kleine stapjes kan worden gedaan. Voor deze experimenten hebben we in Leiden een nieuw oxidatie oventje ontworpen en gebouwd in samenwerking met de Fijn Mechanische Dienst. In



Figuur 9.9: Een QD in een trilholte. Als een foton op een QD valt kunnen er ruwweg drie processen optreden: (I) geen interactie, (II) absorptie gevolgd door emissie, en (III) een fase verandering, of vertraging, van het licht. (b) In een lege trilholte passen er voor resonerend licht een geheel aantal halve golflengtes in de trilholte en wordt het getransmitteerd. (c) Dit resulteert in een dip in de reflectie en een piek in de transmissie van deze trilholte. (d) In een trilholte met een gekoppelde QD wordt een fase verandering geïnduceerd en is het ($\Delta f = 0$ GHz) licht niet langer resonant waardoor het nu gereflecteerd wordt. (e) In metingen is dit zichtbaar als een piek in de reflectie dip en een dip in de transmissie piek.

Hoofdstuk 5 laten we zien hoe de vorm van de oxidelaag gecontroleerd kan worden, en dat de optische eigenschappen van de trilholte hier nauw mee samen hangen. Hierdoor lukt het ons om trilholtes te ontwikkelen die polarisatie ontaard zijn, dat wil zeggen dat elke inkomende polarisatie behouden blijft in de trilholte. Deze eigenschap is essentieel voor de experimenten in Hoofdstukken 6, 7 en 8.

In Hoofdstuk 6 worden ongeladen en enkel-geladen QD's in trilholtes onderzocht. De optische overgangen hebben verschillende polarisatie eigenschappen die wij nu, door middel van de trilholtes, heel duidelijk kunnen waarnemen. Ook kunnen wij door deze studies de interne coherente of incoherente dynamica van de QD's bestuderen.

In Hoofdstuk 7 wordt een geheugeneffect in ons system beschreven. Door licht in de trilholte te koppelen vinden er ook excitaties plaats van andere ladingen buiten de QD's die door de oxide laag gevangen worden. Deze ladingen beïnvloeden de energie van de QD overgangen en leiden tot onder andere hysteresis effecten. Dit gedrag kan met simulaties en door middel van tijdsopgeloste metingen verklaard worden.

In Hoofdstuk 8 wordt een techniek gedemonstreerd waarmee we de coherentie en fase van licht kunnen bepalen dat door de trilholte is getransmitteerd. Als het licht door een QD verstrooid wordt, dan bevat de coherentie van dit licht informatie over

deze wisselwerking. We willen deze informatie gebruiken om in de toekomst de QD eigenschappen te verbeteren. Ook veroorzaken de trilholte en QD een fase verandering die waargenomen kan worden.

Hoofdstuk 9 is een vooruitblik met een vooruitzicht voor verdere metingen en sample verbeteringen. Voor vervolgonderzoek moet met name de coherentie eigenschappen van geladen QD's worden verbeterd. Hiervoor zijn in dit proefschrift belangrijke inzichten en karakterisatie technieken ontwikkeld.

