



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Quantum dots in microcavities: from single spins to engineered states of light

Steindl, P.

Citation

Steindl, P. (2023, July 5). *Quantum dots in microcavities: from single spins to engineered states of light*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3629753>

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/1887/3629753>

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

Samenvatting

In dit proefschrift verkennen we fundamentele experimenten in kwantumoptica, gebaseerd op kwantumelektrodynamica in een optische trillolte, met een enkele zelfgeassembleerde III-V kwantumdot in een optische microholte. Dit systeem heeft een aantal opwindende aspecten, zoals het mogelijk maken om enkele fotonen te produceren met een hoge fidelity voor toekomstige kwantum toepassingen.

Halfgeleider kwantumdots (QD's, in het Engels vertaald als quantum dots) zijn eilandjes op nanometerschaal van een halfgeleider die is ingebed in een andere halfgeleider met een hogere band gap. Door hun kleine omvang hebben QD's discrete elektronische niveaus, waardoor ze net als atomen afzonderlijke fotonen kunnen uitzenden. Anders dan in atomen kunnen de QD-energieniveaus echter worden afgesteld door de samenstelling en de dimensie van de kwantumdot te veranderen, of via het aanleggen van externe velden. Onze zelfgeassembleerde InGaAs kwantumdots zijn gegroeid in het intrinsieke gebied van de GaAs *p-i-n* junctie door het gebruik van moleculaire bundelepitaxie, waardoor de QD-energieniveaus kunnen worden afgesteld via het zogeheten quantum confined Stark-effect. Wij gebruiken dit effect om een QD-overgang in resonantie te brengen met de fundamentele resonantie van een optische microholte waarin de QD is ingebed, of om een extra elektron te vangen in de aanvankelijk ladingneutrale QD. De monolithische optische holte wordt gevormd door twee dunne film Bragg-spiegels bestaande uit afwisselende lagen materialen met verschillende brekingsindices. Het licht in de hoogwaardige optische holte circuleert ongeveer 40 000 keer in de holte voordat het via een spiegel verloren gaat, wat resulteert in een bijna deterministische interactie met de QD en een zeer efficiënte opwekking en extractie van afzonderlijke fotonen.

Wij bespreken de in dit proefschrift gebruikte kwantumdotapparaten en hun optische karakterisering in hoofdstuk 2. Het ontwerp, geïnspireerd op samples die oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor halfgeleiderlasers, heeft een extra elektron blokkerende laag onder de QD's. Door deze extra laag kan de QD worden opgeladen met één elektron op stabiele en deterministische wijze - diens spin werkt als een kwantumgeheugen. Het extra elektron in de QD verandert ook de optische selectieregels die de polarisatie van de fotonen verbinden met de spintoestand aanzienlijk. Bijvoorbeeld: als de enkelvoudig geladen QD optisch wordt geëxciteerd tot de trion-toestand, ontstaan er energie-ontaarde circulair gepolariseerde overgangen. Eenmaal geplaatst in een extern magnetisch veld onder Voigt-geometrie, worden de elektron- en trion-toestand gesplitst door het Zeeman-effect, en verschijnen er twee paren orthogonaal lineair gepolariseerde overgangen, die wij in hoofdstuk 4 laten zien.

Om de elektron- en trion-toestanden te bestuderen met behulp van resonante laserspectroscopie moet de relatief sterke excitatie laser worden uitgefilterd, hiervoor gebruiken wij de kruispolarisatie techniek. De kwaliteit van de kruispolarisatie wordt gekwantificeerd door de extinctieverhouding, die wordt beperkt door de kwaliteit van de optische elementen. Onlangs is echter ontdekt dat deze verhouding kan worden verbeterd door spin-baan koppeling van licht bij optische (Fresnel) reflectie. In hoofdstuk 3 identificeren en onderzoeken we deze effecten in onze cryogene confocale microscoop en gebruiken

we die om de zuiverheid te verbeteren van de losse fotonen geproduceerd door de trion overgang van de QD. Wij vinden een unieke polarisatie-instelling waarbij de extinctieverhouding van een gewone polarisator met een factor 10 overtreft. Wij bewijzen dat deze verbetering gebaseerd is op compensatie van een kleine elliptische component van onze polarisatoren, terwijl spin-baan effecten worden onderdrukt door het filteren met een single-mode glasvezel. Om het gebruik van de elektronenspin als kwantumgeheugen te onderzoeken, moeten de spintoestanden worden gesplitst door een extern magnetisch veld. In hoofdstuk 4 ontwikkelen we een eenvoudige constructie met een koude permanente magneet die bijna 0,5 T levert bij cryogene temperaturen. Door onze enkelvoudig geladen QD met deze constructie af te koelen, konden we laserspectroscopie met twee kleuren uitvoeren en de spin dynamiek van de QD zichtbaar maken.

In de hoofdstukken 5 en 6 gebruiken we een hoogwaardige één-foton bron om kwantum-optica-experimenten uit te voeren die onmogelijk zijn met klassieke velden. In onze experimenten gebruiken wij Hong-Ou-Mandel-interferentie om met individuele fotonen te bundelen en zo kwantumtoestanden van licht te produceren met een complexe fotonstatistiek.

In hoofdstuk 5 bestuderen we theoretisch het toevoegen van één foton aan coherente toestanden op een onevenwichtige bundelsplitser. De kwantumtoestanden die uit één uitvoerpoort van de bundelsplitser komen, hebben niet-Gaussische eigenschappen. Deze toestanden zijn interessant voor kwantumcomputers en -communicatie die gebruik maken van continue variabelen, maar het is een hele uitdaging om deze te produceren. Wij stellen een eenvoudige methode voor, gebaseerd op foton correlaties, om het succes van het experiment te bevestigen. De twee-foton correlaties vertonen een universeel maximum waarmee de fidelity van de één-foton toevoeging kan worden geoptimaliseerd.

Tenslotte creëren we in hoofdstuk 6 experimenteel kunstmatige coherente toestanden van losse fotonen. In feite gebruiken we Hong-Ou-Mandel-interferentie herhaaldelijk in een optische vertraging lus en manipuleren we een stroom van losse fotonen die wordt geproduceerd door onze QD-trilholte-bron. Dit stelt ons in staat om per foton complexe superposities van foton-getallen te maken met afstembare statistiek, vergelijkbaar met Poisson verdeling van voor coherente toestanden. De foton correlaties in combinatie met onze modellen laat zien dat de kunstmatige coherente toestanden veel interessanter zijn dan gewone coherente toestanden en verstrengeling van meerdere fotonen bevat in de vorm van lineaire cluster toestanden, een potentiële bron voor universele kwantumcomputing.