

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32591> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Ding, Dapeng

Title: Cavity quantum electrodynamics with rare-earth ions in solids

Issue Date: 2015-03-12

Samenvatting

Zeldzame-aarde atomen vormen zeventien chemische elementen in het periodiek systeem. Ze zijn meestal onbekend bij niet-wetenschappers, want er is geen object geheel gemaakt van deze elementen, en in ons dagelijks leven en biologische processen lijken ze geen rol te spelen—ons lichaam heeft ze niet nodig. De meeste mensen hebben wellicht nog nooit gehoord van hun namen, zoals Europium, Holmium, Thulium, Ytterbium etc. Toch blijken zeldzame-aarde elementen van belang te zijn voor technologische toepassingen, variërend van lasers, magneten, lampen, legeringen en katalysatoren tot supergeleiders. Zij worden typisch in kleine hoeveelheden toegevoegd aan andere materialen, bijvoorbeeld tijdens glasvorming, tijdens materiële groei, door implantatie of door diffusie, en hebben een belangrijke invloed op de eigenschappen van de resulterende materialen. Anders dan de naam aangeeft zijn zeldzame-aarde atomen niet zo zeldzaam in de aardkorst. Hun aanwezigheid is vergelijkbaar met die van koper en duizenden keren groter dan die van goud of platina. De naam komt vooral door het feit dat deze elementen meestal niet geconcentreerd zijn in de vorm van mineralen, een feit dat exploitatie moeilijk maakt.

Wat maakt zeldzame-aarde atomen zo speciaal en waarom worden ze gebruikt in tal van toepassingen, in het bijzonder in optische toepassingen? Alle atomen in de gasfase hebben duidelijke optische eigenschappen die in het algemeen informatie verschaffen over de buitenste elektronische banen van de atomen. Omdat de elektronische banen discrete welbepaalde energiewaarden hebben zal een elektron dat geëxciteerd is in een hoog energieniveau vervallen naar een lager niveau via het uitzenden van het verschil in energie in de vorm van lichtquanta. De buitenste elektronische banen spelen tevens een belangrijke rol bij het condenseren van atomen tot een stuk materiaal. Daardoor kunnen ze meestal niet meer deelnemen aan de optische processen die typerend zijn voor atomen in de gasfase. Het uitzonderlijke van zeldzame-aarde atomen is dat zij hun optische eigenschappen in grote mate behouden wanneer ze ingebed zijn in een materiaal. De reden hiervoor is dat zeldzame-aarde atomen bepaalde elektronische banen bezitten die niet volledig zijn gevuld met elektronen en die worden omringd door andere volledig gevulde elektronische banen. Dit betekent dat de optische overgangen plaatsvinden in een “beschermd kooi”.

Daarom kunnen zeldzame-aarde atomen in een vaste stof worden beschouwd als “vrije” atomen met schone optische eigenschappen gevangen op een vaste plaats in de vaste stof. Deze speciale functie biedt grote voordelen ten opzichte van andere chemische elementen. In de gasfase bewegen atomen willekeurig met zeer hoge snelheden en botsen met elkaar. De beweging verschuift de overgangsfrequentie (Doppler effect) en maakt het volgen van individuele atomen bijna onmogelijk, terwijl de botsingen de quantumeigenschappen ondermijnen. Het is mogelijk om individuele atomen met behulp van laserlicht op te sluiten en te koelen maar deze techniek vereist ingewikkelde apparatuur en lijkt niet eenvoudig op te schalen te zijn tot veel atomen tegelijkertijd, iets wat nodig is voor toekomstige toepassingen op het gebied van de quantuminformatica.

Dat zeldzame-aarde atomen optisch functioneel blijven ook in vaste stoffen zoals glas en kristallen is daarom van bijzonder belang voor dit gebied. In dit proefschrift beschouwen we het zeldzame-aarde atoom Ytterbium. Dit atoom verliest drie elektronen om een ion (geladen atoom) in vaste stoffen te vormen, maar de elektronen die verantwoordelijk zijn voor de optische eigenschappen zijn nog steeds veilig beschermd in het ion. De positie van de ionen is vast, maar bij eindige temperaturen is er nog wel thermische trilling waar rekening mee gehouden moet worden. De zeldzame-aarde ionen kunnen in principe als quantumbits geïntegreerd worden op een kleine chip net als de CPU in onze normale computers.

Een quantumcomputer kan worden gezien als het ultieme doel van het onderzoek gestart in dit proefschrift. Om dit doel te bereiken, moeten zowel de quantumtoestanden van individuele zeldzame-aarde ionen en de interacties tussen de ionen goed onder controle zijn. Omdat de atomaire overgangen tussen de quantumtoestanden worden geassocieerd met de absorptie of emissie van licht, kan licht worden gebruikt voor het initialiseren van de quantumtoestanden van de ionen, voor de interacties tussen de ionen (quantumoperaties), en voor het uitlezen van de quantumtoestanden (berekening resultaten). Daarom is het duidelijk dat het beheersen van de licht-ion interactie een cruciale eerste stap is in het bouwen van een quantuminformatieverwerkingssysteem op basis van zeldzame-aarde ionen in vaste stoffen. De uitdaging ligt in het feit dat de interactie tussen zeldzame-aarde ionen en licht zwak is, ongeveer een miljoen maal zwakker dan de interacties in neon lampen of kwikdamplampen. Deze zwakke wisselwerking is een reflectie van de lange levensduur van de aangeslagen toestanden—de typische tijd die het duurt voordat het atoom vervalt van de aangeslagen toestand naar de grondtoestand via spontane emissie. De levensduur van de aangeslagen toestanden van zeldzame-aarde ionen is in de orde van grootte van milliseconden (een duizendste van een seconde), terwijl het in de orde van nanoseconden (een miljoenste van een milliseconde) voor neon en kwikatomen is. Met andere woorden, de spontane emissie (de inverse levensduur die beschrijft hoe snel de spontane emissie plaatsvindt) van

zeldzame-aarde ionen is een miljoen maal kleiner dan neon en kwik. Met zo'n kleine spontane emissie, is het uiterst moeilijk om een enkel zeldzame-aarde ion te detecteren, laat staan quantummanipulaties te implementeren en het ion te gebruiken als een quantumbit.

Dit proefschrift heeft als doel om dit probleem aan te pakken met behulp van optische resonatoren om de interactie tussen licht en de ionen te versterken. Dit effect staat bekend als het Purcell effect, naar de natuurkundige Edward Purcell, en kan worden beschreven binnen het theoretisch kader van de resonator quantumelektrodynamica. Een optische resonator is een systeem dat licht opvangt voor een zekere tijd en binnen een bepaald volume. Hoe langer de tijd dat het licht gevangen blijft en hoe kleiner het volume van de resonator, hoe sterker het lichtveld kan worden in de resonator. Omdat de licht-ion interactie evenredig is met de plaatselijke lichtveldsterkte, wordt de licht-ion interactie verbeterd als een ion geplaatst wordt in het maximum van het veld in de optische resonator. In dit proefschrift beschouwen we een optische resonator gemaakt uit een golfgeleider in de vorm van een ring op een siliciumchip. Een golfgeleider is een optische microstructuur die licht kan geleiden. Wanneer de geleider gebogen is in een ringvorm, een zogenaamde ring resonator, wordt het licht effectief gevangen in de ring. De ring resonator kan op de chip gekoppeld worden aan andere golfgeleiders die het licht in en uit de ring resonator kunnen leiden. Deze architectuur lijkt op een elektrisch circuit waar transistors (ring resonator en zeldzame-aarde ionen hier) verbonden zijn met elektrische draden (golfgeleiders hier). Het verschil is dat we licht transporteren op de chip in plaats van elektrische stroom. De fabricage procedures voor de ringresonator en golfgeleiders zijn vergelijkbaar met die van geïntegreerde schakelingen en kunnen gemakkelijk worden opgeschaald naar veel ringresonatoren verbonden met golfgeleiders. Dit is van belang in het kader van quantumcomputers.

Met zeldzame-aarde ionen geïmplanteerd in een hoge kwaliteitsfactor (gelijk aan lange opsluittijd van het licht) en relatief klein volume ring resonator in handen, zijn wij nog steeds een stap verwijderd van het zien van de verbeterde licht-ion interactie. Een belangrijke factor is de temperatuur, omdat de thermische schommelingen bij kamertemperatuur de quantumeigenschappen van de ionen, die cruciaal zijn voor het optreden van het Purcell effect, aanzienlijk verminderen. We moeten het systeem dus afkoelen tot lage temperatuur om het Purcell effect te kunnen waarnemen. In het experiment beschreven in het proefschrift wordt eerst gekoeld tot 5 K (5 graden boven het absolute nulpunt, of -268 graden Celsius) en wordt inderdaad een verbetering van de interactie met een factor 4 (4 keer hogere spontane emissie) waargenomen. In het daaropvolgende experiment hebben we verder afgekoeld tot 50 mK (0.05 graden boven het absolute nulpunt, of -273 graden Celsius) en een verbetering met een factor 9 waargenomen. De resultaten geven aan dat een volledig geoptimaliseerde ringresonator met een hogere kwaliteitsfactor en een kleiner vol-

ume uiteindelijk optische detectie en quantumtoestand controle van een enkele zeldzame-aarde ion moet toestaan.

Dit proefschrift behandelt de details van mijn onderzoeksactiviteiten op het gebied van de zeldzame-aarde ionen en ringresonatoren gedurende mijn doctoraat. In het eerste inleidende hoofdstuk wordt de achtergrondkennis die nodig is om dit proefschrift te begrijpen gepresenteerd en de huidige status van dit veld geschetst. In het tweede hoofdstuk worden metingen aan een resonator zonder Ytterbium atomen gepresenteerd, en worden de eigenschappen van de resonator volledig gekarakteriseerd. Vooral bestuderen we de Fano resonantie (asymmetrische resonantievorm) in de transmissie spectra. In het derde hoofdstuk worden de technieken die het onderzoek naar de licht-ion interactie mogelijk maken gepresenteerd. Vooral worden de zeldzame-aarde-ionenimplantatie methode en het koppelen van optische glasvezels aan de golfgeleiders op de chip besproken. Hoofdstuk 4 is gewijd aan de theorie, experimenten en resultaten van de ringresonatoren met geïmplanteerde zeldzame-aarde ionen bij een temperatuur variërend van kamertemperatuur tot ongeveer 5 K. In hoofdstuk 5 worden de metingen uitgebreid tot temperaturen van 50 mK. Hoofdstuk 6 presenteert theoretische onderzoek naar collectieve effecten van zeldzame-aarde ionen in een optische resonator. Hoofdstuk 7 sluit dit proefschrift af en geeft een vooruitblik op toekomstig onderzoek.