



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Photon detection at subwavelength scales

Wang, Q.

Citation

Wang, Q. (2015, October 27). *Photon detection at subwavelength scales*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/35972>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/35972>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/35972> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Wang, Qiang

Title: Photon detection at subwavelength scales

Issue Date: 2015-10-27

Samenvatting

Licht stelt ons in staat om de wereld en de natuur om ons heen waar te kunnen nemen zodat we hiervan kunnen genieten en de door het licht gedragen informatie in het dagelijks leven kunnen gebruiken. Wat we met onze ogen waarnemen is het verstrooide of gereflecteerde licht van de voorwerpen. Voor het begrip van het alledaagse verschijnsel licht is een beschrijving van licht als een elektromagnetische golf afdoende.

In veel wetenschappelijk onderzoek wordt gebruik gemaakt van licht; het is in veel gevallen het gereedschap waarmee inzicht in en begrip van materie op zeer kleine schaal en/of een dieper niveau wordt verkregen. Naast het klassieke gedrag van licht als een golf vertoont het ook kenmerken die wij normaal toeschrijven aan een deeltje. Deze lichtdeeltjes worden fotonen genoemd. Deze beschrijving van licht is van essentieel belang bij onderzoek op het gebied van de kwantum optica en kwantum informatie. In dit proefschrift worden zowel de golf- als de deeltjesbeschrijving toegepast.

Ongeacht de beschrijving zal het licht wisselwerken met een voorwerp, hetzij het oog, een camera of een enkel-foton detector. Het begrijpen van deze wisselwerking is al vele jaren een onderwerp van wetenschappelijk onderzoek. Het onderzoek dat in dit proefschrift wordt beschreven heeft dit als thema met een sterke nadruk op de wisselwerking van één, twee, of meerdere fotonen met een supergeleidende nanodraad als microscopische detector.

Supergeleiding is een verschijnsel waarbij de elektrische weerstand van een materiaal volledig verdwijnt wanneer het wordt afgekoeld tot vlak bij het absolute nulpunt. Het materiaal dat in dit proefschrift wordt bestudeerd is Niobium Nitride (NbN) dat in de vorm van nanodraden op een oppervlak is neergelegd. Bij een temperatuur beneden de 10 K worden deze draden supergeleidend. De afmetingen van de draad en de stroom door de draad zijn zodanig gekozen dat de energie van één enkel foton voldoende is om de draad te schakelen van de supergeleidende naar de normale toestand. De elektrische weerstand in de normale toestand zorgt vervolgens voor een spanningsval die kan worden versterkt en vastgelegd. Een bijzondere eigenschap van deze nanodraden is dat de spanningsval ook bij lagere waarden van de stroom kan worden waargenomen. Dit wordt veroorzaakt door twee of meer fotonen die tegelijk worden geabsorbeerd

door de draad.

De nanodraden in mijn onderzoek zijn typisch 50–200 nm breed en 5 nm dik. Dat is 5–20 keer smaller en 200 keer dunner dan de golflengte van het licht dat ik gebruik. De beschrijving van licht als een golf volstaat om de absorptie van licht door de nanodraad te begrijpen. Wat gebeurt er daarna precies? Nader onderzoek is nodig om ook de fysische processen te begrijpen die leiden tot het schakelen van de draad. Nabije-veld microscopie is onontbeerlijk in dit onderzoek omdat met deze techniek licht kan worden gebundeld op een lengteschaal die veel kleiner is dan de golflengte van het licht. Nabije-veld microscopen gebruiken een scherpe metalen punt of een gat in een dunne laag metaal om licht op een oppervlak af te tasten. In beide gevallen wordt er licht verstrooid naar een foton-gevoelige detector. Het te meten signaal is echter verwaarloosbaar klein, omdat het fysische proces van lichtverstrooiing bijzonder inefficiënt is voor voorwerpen die veel kleiner zijn dan de golflengte van het licht.

Deze inherent lage efficiëntie maakt nabije veld microscopie met één enkel foton nagenoeg onmogelijk. In dit proefschrift wordt een nieuwe methode beschreven waarbij een NbN nanodetector wordt gebruikt als sonde in het nabije veld. Deze methode profiteert van het feit dat voor zeer kleine deeltjes de kans op absorptie van licht vele malen groter is dan de kans op verstrooiing. Op basis van de numerieke simulaties in hoofdstuk 5 schatten we dat een NbN detector van $50 \times 50 \text{ nm}^2$ kan worden gebruikt als een sonde die 100 keer gevoeliger is dan een vergelijkbare sonde die gebruikt maakt van lichtverstrooiing. Tegelijkertijd is de versturende werking op de optische vervalstijd van een nabijgelegen kwantum dot veel kleiner.

Het onderliggende detectie mechanisme van een supergeleidende enkel-foton detector kan worden onderzocht met behulp van kwantum detector tomografie. Deze methode telt het aantal detectie gebeurtenissen per seconde als functie van het gemiddeld aantal fotonen dat op de detector valt. Deze gegevens worden gebruikt om het absorptie-rendement, en de kans op detectie van exact één, twee, drie etc. fotonen te bepalen. De beschrijving in termen van het aantal fotonen is een essentiële stap in het begrip van het detectiemechanisme omdat dit inzicht geeft in de detectiekans als functie van de totale energie van de fotonen. De methode en de nauwkeurigheid worden nader onderzocht in hoofdstuk 2.

Detector tomografie scheidt de kans op optische absorptie van de kans om na absorptie een meetbare spanningspuls te genereren. De fysica van dit laatste proces kan natuurlijk niet afhankelijk zijn van de polarisatie van het al geabsorbeerde foton want die informatie is al verloren. Het is daarom verrassend dat onze tomografie experimenten duidelijk laten zien dat de kans op het genereren van een spanningspuls na optisch absorptie toch afhangt van de polarisatie van het invallende licht.

De verklaring voor deze waarnemingen wordt gegeven in de hoofdstukken 3 en 4 van dit proefschrift. Berekeningen laten zien dat de absorptiekans in de draad op een polarisatie gevoelige manier afhangt van de transversale positie op die draad. Als ook de kans dat het absorberen van een foton resulteert in een klik van de detector afhangt van de positie waar het foton is geabsorbeerd, dan geeft dit een polarisatie afhankelijke respons. Door kwantum-detector tomografie te doen voor verschillende golflengtes van het licht kunnen we de positie-afhankelijke interne detectie efficiëntie van de nanodraad bepalen. Hieruit blijkt dat de randen van de nanodraad beter als foton detector werken dan het midden van de draad. Dit resultaat is in goede overeenstemming met al bestaande fysische modellen van het detectie proces die de detectie verklaren met behulp van magnetische vortices in de supergeleider. Deze vortices worden tegengehouden door een potentiaal barrière aan de randen van de draad. Absorptie van een foton verlaagt de barrière waardoor de vortex de draad kan oversteken. Bij het oversteken van de vortex wordt arbeid verricht waardoor de supergeleidende nanodraad schakelt.

Een vergelijking met metingen van de polarisatie-afhankelijke kwantumefficiëntie van een detector bestaand uit een meanderende draad laat zien dat de door ons experimenteel bepaalde lokale detectie efficiëntie ook het gedrag van deze detectoren goed voorspelt. Echter, de huidige theoretische modellen voorspellen een te groot verschil tussen de respons van de randen en het midden van de draad. Om deze impasse te doorbreken is een directe waarneming van de lokale detectie-efficiëntie van een NbN detector nodig.

Als een eerste stap in deze richting worden in dit proefschrift realistische simulaties van nabije-veld microscopie aan een NbN nanodraad beschreven. In deze simulaties wordt een scherpe metalen punt gebruikt om het licht te concentreren op de NbN detector. De kegelvormige metalen punt wordt daarbij op een afstand van 5 nm boven de nanodraad geplaatst waarbij licht vanaf de zijkant op de metalen tip valt. De metalen tip werkt als antenne waarmee het licht wordt geconcentreerd op het uiteinde van de tip waarbij een resolutie kan worden bereikt van 20 nm. Met een dergelijke puntbron kan de detector worden afgetast op de nanoschaal.

Nieuwe toepassingen van nabije-veld microscopie komen met dit onderzoek binnen bereik. Een nano-detector geplaatst op een piramide of pilaar kan worden gebruikt als een nieuwe sonde voor nabije-veld microscopie. Door de stroom door de detector in te stellen wordt het mogelijk om nabije-veld microscopie op één, twee, drie etc. foton niveau te bedrijven.

