



*Optical Antennas on Substrates and Waveguides*  
F.A. Bernal Arango

## Samenvatting

Momenteel staat onze samenleving voor twee grote uitdagingen: een uitdaging in informatietechnologie, waar een toenemende groep gebruikers toegang wil hebben tot steeds meer bandbreedte, en een uitdaging in energie, waar het doel is om duurzaam te voorzien in de wereldwijde energie consumptie zonder afhankelijk te zijn van fossiele brandstoffen. Voor beide problemen worden mogelijke oplossingen gezocht in de efficiënte manipulatie en controle over licht. Voor informatietechnologie heeft licht het grote voordeel dat signalen gemultiplexed kunnen worden door het coderen van informatie in verschillende golflengtes, waardoor er door 1 enkele fiber Terabyte aan data per seconde gestuurd kan worden. Wat betreft het energie probleem is het zo dat als we in staat zijn om 0.02% van alle zonne-energie die jaarlijks op de aarde valt op te slaan we volledig voldoen aan onze energie behoefte. Beide uitdagingen vereisen nauwkeurige controle over hoe licht interageert met materie door middel van emissie, absorptie en verstrooiing. In de afgelopen tien jaar is deze controle sterk verbeterd door recent ontwikkelde ontwerp ideeën en fabricage mogelijkheden voor nanofotonische structuren. Om in deze richting bij te dragen aan de wetenschap exploreren we manieren waarop we meer intuïtief complexe nanofotonische structuren samengesteld uit metalen verstrooiers in dielectrische media kunnen begrijpen en ontwerpen. Metalen verstrooiers worden momenteel intensief bestudeerd op het gebied van "Plasmonics". In het bijzonder kunnen structuren gemaakt van nobele metalen goede 'antennes' zijn die het licht sterk verstrooien en licht kunnen opsluiten. In dit proefschrift richten we ons specifiek op de vraag hoe we zulke antennes kunnen integreren met dielectrische structuren zoals golfgeleiders die zonder verliezen informatie kunnen transporteren.

We beginnen dit proefschrift met hoofdstuk 2 waar we verstrooiingsexperimenten beschrijven op enkele plasmonische nano-antennas die gefabriceerd zijn op golfgeleiders die bestaan uit een siliciumnitride strip op een kwartssubstraat, en die slechts een enkele optische mode geleiden. Het doel van dit experiment is om uit te zoeken hoe sterk de interactie is tussen het licht dat zich voortplant in de golfgeleider en de plasmon antennes met als uiteindelijke doel het verkrijgen van een plasmonische bouwsteen om reciproke conversie mogelijk te maken tussen golfgeleider modes en de sterk gelokaliseerde velden die een interactie kunnen hebben met bijvoorbeeld actieve materialen. Het blijkt dat we de respons van de plasmonische nanostaafjes op de enkele mode golfgeleider kunnen vereenvoudigen tot die van elektrische dipool verstrooiers op een systeem van multilagen. Wanneer de nano-antennes geëxciteerd worden op hun resonantie dan verstrooien ze tot 20% van het licht van de golfgeleider mode, wat demonstreert dat er een sterke interactie is tussen de plasmonische antenne en de

golfgeleider mode. Om controle te krijgen over het verstrooiingsproces gebruiken we deze bouwsteen als basis voor meer complexe antennes. In hoofdstuk 3 bouwen we verder op de resultaten uit hoofdstuk 2, en bestuderen zogenaamde “gefaseerde antenne arrays”, bestaande uit een aantal plasmonische nanostaafjes op nanoschaal afstand van elkaar gegroepeerd op een golfgeleider. In dit hoofdstuk karakteriseren we het verstrooiingsproces dat ontstaat door de gefaseerde array antennes op een waveguide. Het blijkt dat, net als de enkele antennes ook deze gefaseerde array antennes sterk koppelen aan de golfgeleider mode. Daarnaast zien we dat de interferentie door de verstrooiing van verschillende elementen van de antenne ervoor zorgt dat het systeem directioneel verstrooit, en dit geldt voor zowel verstrooiing uit de waveguide mode als verstrooiing in de waveguide mode. De studie van hoofdstuk 3 inzake het inkoppelen van licht van puntbronnen complementeren we met experimenten beschreven in hoofdstuk 4, waar we gefaseerde array antennes bestuderen met lokale excitatie. Hiervoor hebben we een kathodeluminescentie meetopstelling gebruikt waarmee we nanometrisch precies gepositioneerde puntbronnen kunnen genereren op de Yagi-Uda antennes. Door puntdipool theorie te gebruiken en een statistische analyse toe te passen kunnen we kenmerken verklaren die te zien zijn in de verkregen positieafhankelijke exciteerbaarheidskaarten. We concluderen hieruit dat Yagi-Uda antennes zeer robuust zijn wat betreft van directionele verstrooiing, maar uitzonderlijk gevoelig zijn voor wanorde wat betreft de vergroting van stralingsvermogen van de antenne.

In hoofdstuk 5 verplaatst het aandachtsgebied van het proefschrift zich naar het ontwikkelen van een analytische theorie die ons in staat stelt optische nano-antennes te begrijpen en te ontwerpen. In dit hoofdstuk presenteren we een numeriek model waarmee we de polariseerbaarheidstensor van optische antennes met een willekeurige geometrie kunnen verkrijgen. We hebben twee manieren om de polariseerbaarheidstensor te vinden. Ofwel de verstrooide velden worden weergegeven als een expansie in vector bolfuncties (VSH), ofwel er worden effectieve oppervlakte stromen geïntegreerd die aangedreven worden op het oppervlak van de verstrooiers. We vergelijken beide routines en zien dat de VSH methode nauwkeuriger is dan de effectieve stroom routine. In hoofdstuk 6 passen we deze methode om de polariseerbaarheidstensor te verkrijgen toe op één van de meest iconische optische antennes: de 'Split Ring Resonator' (SRR). We laten zien dat de SRR een sterke magneto-optische koppeling heeft die 27% is van de elektrische polariseerbaarheid. We gebruiken de multipool expansie van deze magneto-electrische antenne om een nieuwe multi-element antenne te ontwerpen gebaseerd op de SRR, die interessante kenmerken heeft. Zo blijkt het een directionele stralingsbron van elliptisch gepolariseerd licht te zijn. De ellipticiteit van het uitgestraalde licht kan vergroot worden door magneto-electrische verstrooiers te gebruiken met nog sterkere magneto-optische koppeling dan de SRR.

In hoofdstuk 7 breiden we het puntdipool model uit door ook elektrische quadrupool momenten mee te nemen. We gebruiken deze uitgebreide theorie om het gedrag van twee soorten antennes te analyseren. De eerste is de zogenaamde 'dolmen' antenna waarvan al is aangetoond dat deze een sterke quadrupool mode heeft. We kwantificeren de bewering gemaakt in eerdere artikelen dat spectraal smalle kenmerken die zichtbaar

zijn in het extinctie spectrum, bekend als zogenaamde 'Fano interferentie' of 'plasmon-geïnduceerde transparantie' (PIT) toe te schrijven zijn aan een quadrupolaire respons. We laten zien dat PIT niet alleen aan de quadrupolaire mode is toe te schrijven, maar dat ook de magnetische dipolaire mode bijdraagt - een mode die vaak buiten beschouwing wordt gelaten. Deze mode draagt net zo veel bij aan het interferentie proces als de quadrupool mode. Het tweede type antenne die we analyseren is de aluminium nanopyramide. Door gelijktijdig te optimaliseren voor de elektrische en magnetische dipool en de elektrische quadrupool laten we zien dat deze nanopyramides geschikt zijn om het veld asymmetrisch op te sluiten.. Dit heeft mogelijke toepassingen in het verbeteren van LED verlichting en voor zonnecellen. Tot slot laten we in hoofdstuk 8 zien hoe we de uitgebreide puntquadrupool-dipool theorie kunnen gebruiken wanneer er ook een substraat aanwezig is. Grote, platte nanocylinders van goud blijken sterke quadrupolaire momenten te hebben als ze op een silicium substraat liggen. Door de interferentie van de verschillende multipolaire elementen hebben deze 'nanovuurtorens' het bijzondere kenmerk dat ze verstrooid licht sterk één kant op sturen hoewel de antenne zelf maar uit één element bestaat. Wij passen onze theorie toe op kathodeluminescentiemetingen gedaan aan deze nanocylinders en verklaren de metingen.