UNIVERSITY OF AMSTERDAM

UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Angle-resolved cathodoluminescence nanoscopy

Coenen, T.

Publication date
2014

Link to publication

Citation for published version (APA):
Coenen, T. (2014). *Angle-resolved cathodoluminescence nanoscopy*. [Thesis, externally prepared, Universiteit van Amsterdam].

General rights
It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations
If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: https://uba.uva.nl/en/contact, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, P.O. Box 19185, 1000 GD Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

UvA-DARE is a service provided by the library of the University of Amsterdam (https://dare.uva.nl)

Download date:04 Nov 2026

Samenvatting

Het veld van de microscopie is een belangrijke hoeksteen van de fysische en biologische wetenschap. De ontwikkeling van hoge-resolutie microscopie- en nanoscopietechnieken heeft een revolutie teweeggebracht in de wetenschap en technologie. Het heeft ons begrip van de microscopische wereld om ons heen sterk verbeterd en vormde de basis voor de ontwikkeling van geavanceerde nanotechnologie. Net als voor geïntegreerde elektrische circuits, bestaat er een drijfveer om optische componenten te miniaturiseren met het doel om licht te genereren, detecteren, geleiden, of te schakelen op de nanoschaal. Om dit opkomende veld van de nanofotonica te ondersteunen zijn er experimentele technieken waarmee optische eigenschappen op de deze lengteschaal bestudeerd kunnen worden. In dit proefschrift presenteren we een nieuwe experimentele nanoscopietechniek die gebruikt kan worden om optische eigenschappen op de nanoschaal te meten: hoekopgeloste kathodeluminescentie beeldvorming spectroscopie (Angle-resolved Cathodoluminescence (CL) Spectroscopy (ARCIS) in het Engels).

Deze techniek combineert elektronenmicroscopie met optische microscopie, waardoor de excitatieresolutie veel beter is dan voor optische microscopie en de techniek nog steeds optisch gevoelig is. Met ARCIS kunnen zowel het emissiespectrum als het emissiehoekprofiel met grote precisie gemeten worden. Hoofdstuk 2 beschrijft hoe de techniek werkt. We bespreken verschillende vormen van elektron-materie interactie en elektrongeïnduceerde straling en geven een uitgebreide technische beschrijving van de opstelling. We geven tevens een korte beschrijving van elektronen energieverlies spectroscopie (Electron Energy-Loss Spectroscopy (EELS) in het Engels), wat een complementaire techniek is van ARCIS. In Hoofdstuk 3 beschrijven we de rekenprocedures om het emissie hoekprofiel van een nanostructuur te bepalen met ARCIS. De techniek wordt gekalibreerd door het hoekprofiel van een bekende bron de bestuderen: transitiestraling van een monokristallijn goudoppervlak.

In de hoofdtekst van het proefschrift hebben we de ARCIS techniek toegepast op een aantal verschillende metalen en diëlektrische nanostructuren om de algemene toepasbaarheid op de nanofotonica aan te tonen. De meeste van deze structuren

werken als nanoantennes: de elementaire bouwblokken van de nanofotonica. Nanoantennes vormen het grensvlak tussen het nabije en het verre veld en kunnen complexe hoekafhankelijke stralingsprofielen en verstrooiingsspectra vertonen die gemeten kunnen worden met ARCIS. Door het proefschrift heen hebben we gebruik gemaakt van moderne nanofabricagetechnieken zoals elektronenbundel lithografie en gefocusseerde-ionenbundel frezen die het mogelijk maken om optische nanostructuren met grote precisie te fabriceren.

In Hoofdstuk 4 gebruiken we ARCIS om de optische eigenschappen te bestuderen van een ketting van gouden nanodeeltjes die werken als een subgolflengte optische Yagi-Uda antenne. We demonstreren dat de ketting sterk lichtsturend is en dat dit gecontroleerd kan worden door selectief een van antenne elementen aan te drijven. De hoekafhankelijkheid van de antennestraling modelleren we met behulp van een gekoppelde-dipool model dat de interactie tussen de deeltjes en met het substraat meeneemt.

In Hoofdstuk 5 onderzoeken we de optische eigenschappen van plasmonische gouden richelantennes met verschillende lengtes, die werken als propagerende-golf antennes. De reflectieve eindfacetten van de richelantennes zorgen voor staande golven op de richel die gevisualiseerd kunnen worden met ARCIS. Uit de data leiden we de dispersierelatie af voor de plasmonische golfgeleider mode. Gebaseerd op de gemeten hoekprofielen concluderen we dat voor kleine richels het hoekprofiel goed beschreven kan worden door een enkele dipool. De langere antennes stralen in een ingewikkelder patroon, wat wordt bepaald door de interferentie tussen de twee stralende eindfacetten van de antennes.

Hoofdstuk 6 introduceert polarisatiegevoelige Fouriermicroscopie als een extra uitbreiding van de ARCIS techniek. We analyseren de hoek- en polarisatieverdelingen voor transitiestraling van een goudoppervlak en van een richel antenne en vergelijken deze met theoretische verdelingen. We laten zien dat we het experimenteel gemeten polarisatiegefilterde hoekprofiel precies kunnen voorspellen, mits de theoretische polarisatie- en hoekverdelingen bekend zijn. Verder demonstreren we dat het ook mogelijk is om de emissiepolarisatie te reconstrueren zonder *a priori* kennis van de bron, waardoor de elektrische dipool oriëntatie precies bepaald kan worden.

In Hoofdstuk 7 gebruiken we ARCIS om elliptische arenatrilholtes te karakteriseren die in een goud substraatzijn gefreesd. We beelden de plasmon modes in de trilholtes af en laten zien dat het resonantiespectrum alleen afhangt van de lange-as-afstand en de reflectiefase aan de wanden van de trilholte. Tenslotte demonstreren we dat deze elliptische trilholtes werken als parabolische antennes en daarom opmerkelijke lichtsturing vertonen die kan worden beïnvloed door de grootte, excentriciteit van de ellips, golflengte en de positie van de elektronenbundel.

Hoofdstuk 8 beschrijft hoe een enkel plasmonisch nanodeeltje kan werken als een directionele verstrooier. Met behulp van ARCIS laten we zien dat de hoekafhankelijkheid van de straling van het deeltje sterk afhangt van de excitatiepositie en dat dit kan worden gebruikt om licht in een goed gedefinieerde richting te sturen. Dit gerichte stralen wordt veroorzaakt door interferentie tussen elektrische

en magnetische multipoolcomponenten in en uit het vlak. De lichtsturing wordt versterkt voor grotere deeltjes als gevolg van substantiëlere bijdragen van hogereorde multipolen aan de verstrooiing. Met een combinatie van numerieke simulaties en analytische puntverstrooiingstheorie bepalen we de relatieve bijdrage van verschillende multipolen.

In Hoofdstuk 9 bestuderen we de spectrale en hoekafhankelijke eigenschappen van nanoschaal gaatjes in een goudfilm. We bestuderen het verval van het CL signaal weg van het gat om onderscheid te maken tussen directe nabije-veld koppeling en indirecte oppervlakteplasmonpolaritonexcitatie. Verder observeren we een complementariteit in de hoekafhankelijke stralingseigenschappen van de gaatjes in vergelijking met de nanodeeltjes uit Hoofdstuk 8. De data worden vergeleken met numerieke simulaties en een simpel analytisch model. De data suggereert dat de geobserveerde lichtsturing wordt veroorzaakt door het Kerker effect waarbij magnetische en elektrische dipoolcomponenten interfereren in het verre veld.

In Hoofdstuk 10 maken we gebruik van EELS- en CL-metingen om meer inzicht te krijgen in de nabije-veld koppeling in samengestelde plasmonische "dolmen" (hunebed) antennes. We demonstreren dat de koppelingsefficiëntie naar verschillende modes in het systeem gecontroleerd kan worden door de elektronenbundel precies te positioneren. Tevens bestuderen we de effecten van grootte, ruimte tussen de deeltjes en excitatiepositie op de spectra. Aangezien de EELS en CL experimenten zijn uitgevoerd op dezelfde deeltjes kunnen we de technieken direct vergelijken. Het blijkt dat in sommige gevallen EELS en CL dezelfde informatie geven, terwijl in andere gevallen er duidelijke verschillen zijn die gerelateerd kunnen worden aan verschillen in de verstrooiingsefficiënties van de optische modes.

Hoofdstukken 4-10 bespreken de optische eigenschappen van plasmonische nanostructuren. In Hoofdstukken 11 en 12 verleggen we onze aandacht naar diëlektrische/halfgeleider nanostructuren die ook een belangrijke rol spelen binnen de nanofotonica. In Hoofdstuk 11 bestuderen we de optische modes in 2D siliciumnitride fotonisch-kristalmembranen met ARCIS. We gebruiken CL om gedelokaliseerde modes in hexagonale 2D kristallen en gelokaliseerde modes in fotonisch-kristaltrilholtes af te beelden. Met momentum spectroscopie visualiseren we de ruimtelijk-opgeloste dispersie in het kristal.

Tenslotte bestuderen we in Hoofdstuk 12 het resonante gedrag van siliciumnanoschijfjes met ARCIS. We meten resonantiespectra en de bijbehorende veldverdelingen voor verschillende schijfdiameters. De grotere schijfjes ondersteunen meerdere Mie resonanties met complexe modeprofielen. Met behulp van de hoekprofielen bepalen we het elektrische en magnetische karakter van de schijfresonanties en hun lichtsturende eigenschappen.

Samenvattend introduceert dit proefschrift hoekopgeloste kathodeluminescentie beeldvorming spectroscopie als een nieuwe microscopietechniek waarmee optische eigenschappen kunnen worden bepaald op de nanoschaal. Door elementen van elektronenmicroscopie en optische microscopie te combineren zijn we in staat optische verschijnselen te bestuderen die anders onmogelijk te zien zijn met andere technieken.