

Samenvatting

In de afgelopen decennia heeft een aanzienlijke stijging van de mondiale vraag naar energie plaatsgevonden, wat uitdagingen met zich meebrengt op het gebied van duurzaamheid en het milieu. Het gebruik van hernieuwbare energietechnologieën, zoals zon, wind, waterkracht en aardwarmte, biedt een duurzamer alternatief met een lagere koolstofemissie vergeleken met fossiele brandstoffen. De recente ontwikkelingen in de fotonvoltaïsche (PV) technologie, waarbij zonlicht direct in elektriciteit wordt omgezet, hebben geleid tot een hoger rendement en meer veelzijdigheid in verschillende toepassingen. Doordat de geïnstalleerde PV-capaciteit verwacht wordt exponentieel te stijgen in de komende decennia, worden uitdagingen zoals schaarste van materialen en rendement steeds belangrijker.

Dit proefschrift heeft als doel het vervangen van indium tin oxide (ITO) met netwerken van metalen nanodraden, die gebruikt kunnen worden als een transparant geleid materiaal (TGM) voor PV-toepassingen. Er wordt veel onderzoek gedaan naar deze metalen nanodraden-netwerken (MNN) vanwege de excellente elektrische geleiding, mechanische flexibiliteit, en de mogelijkheid om de optische eigenschappen op maat aan te passen. Een belangrijk aspect in deze TGM's is het vinden van een balans tussen de elektrische geleidbaarheid en de optische transparantie, wat wordt uitgedrukt door de Figure of Merit (FoM). De flexibiliteit in het ontwerp maakt het mogelijk om de optische eigenschappen nauwkeurig te controleren en naar wens aan te passen, waardoor ze enorm geschikt zijn voor lichtmanagement in PV-systemen.

In dit proefschrift bestuderen wij een combinatie van elektrodepositie met nano-imprint lithografie, wat een duurzame en schaalbare aanpak biedt voor de productie van nauwkeurig gedefinieerde MNN's met precieze controle over de grootte, vorm, en uitlijning. Dit proefschrift toont aan dat deze methode materialen op een efficiënte manier gebruikt. Deze techniek kan de totale hoeveelheid consumptie van zilver verminderen die vereist is voor de productie van deze TGM's, terwijl de uitstekende werking behouden blijft. De ontwikkeling van deze materialen en methodes draagt bij aan een duurzamere zonne-energie infrastructuur, wat in lijn is met de wereldwijde inspanningen naar een toekomst met schonere en duurzamere energie.

In Hoofdstuk 2 werd een korte introductie van de elektrochemische theorie gegeven, waarbij de definitie van een elektrochemische reactie werd beschreven. Het belang van thermodynamica, de kinetiek van de elektrode en massatransport zijn ook aan bod gekomen, evenals de meest gebruikte elektrochemische technieken. Vervolgens bespraken we de elektrochemische depositie van metalen op externe substraten en het belang van de verdeling van de stroomdichtheid voor de uniformiteit van de depositie. Wij hebben ook een eindige-elementenmethode beschreven om de ruimtelijk-temporele elektrochemische respons van 2D-elektroden te simuleren, inclusief cyclische voltammetrie en chronoamperometrie.

Deze simulaties hebben aangetoond dat de cyclische voltammogram zeer gevoelig is voor de tertiaire stroomverdeling van elektroden met een ruwheid in de orde van micrometers, waarbij de tertiaire stroomverdeling wordt bepaald door het concentratieprofiel van de metaal ionen rondom de oneffenheden van het oppervlak. Ten slotte hebben we dit eindige-elementenmethode platform gebruikt voor het simuleren van de chronoamperometrie tijdens de groei van zilver in geulen met een breedte van enkele tientallen nanometers, wat het hoofdonderwerp van dit proefschrift is. We hebben aangetoond dat deze nanogeulen eenvoudig kunnen worden gemodelleerd door 1D diffusie, voornamelijk omdat de diepte veel kleiner is in vergelijking tot de diffusie lengte.

In Hoofdstuk 3 hebben wij ons verdiept in de elektrochemische nucleatie van zilver op vreemde substraten, in het bijzonder ITO, met behulp van de dubbel-puls methode. We hebben aangetoond dat ITO-substraten met dezelfde technische specificaties (d.w.z. vierkantsweerstand, lichttransmissie en ruwheid) en leverancier nog steeds een verschillende kristallijne textuur kunnen hebben. In dit onderzoek concludeerde we dat de kristallijne textuur een sterke invloed heeft op de nucleatie en groei van zilveren nanodeeltjes tijdens elektrodepositie. We hebben vastgesteld dat de kiemdichtheid van nanodeeltjes op oppervlakken met een voorkeur voor een lagere kristal index (i.e. $<100>$) varieert over enkele orders van grootte, afhankelijk van de aangebrachte nucleatiespanning. Echter, de kiemdichtheid van nanodeeltjes op ITO met oppervlakken met een voorkeur voor de $<111>$ kristal oriëntatie wordt nauwelijks beïnvloed door de nucleatiespanning. Dit hoofdstuk benadrukt het belang van het rapporteren van de oppervlakte-eigenschappen van polykristallijne substraten bij het rapporteren van studies naar de elektrochemische nucleatie en groei van metalen nanodeeltjes.

Vervolgens, in Hoofdstuk 4, hebben we de dubbel-puls methode gecombineerd met substraat-conforme imprint lithografie (SCIL) om roosters van zilveren nanodraden op ITO-substraten te fabriceren om te gebruiken als TGM's in PV-toepassingen. De gepresenteerde methode is gebaseerd op elektrodepositie door een masker, gefabriceerd met SCIL, dat de locatie van het zilver bepaalt. We hebben ontdekt dat de kiemdichtheid van de zilveren nanodeeltjes de belangrijkste parameter is voor het succesvol homogeen opvullen van het masker zonder resterende gaten. Dankzij de kennis die wij in Hoofdstuk 3 hebben opgedaan, kunnen we onafhankelijk de kiemdichtheid van de zilveren nanodeeltjes en hun groei controleren met behulp van de dubbel-puls methode. De zilveren nanodraadroosters vertonen zowel een hoge optische transparantie (95.9%) als een lage vierkantsweerstand (zo laag als $3.7 \Omega/\text{sq}$), wat resulteert in een superieure FoM. Vanwege het selectief opbouwende karakter van deze techniek kunnen nanodraden met een willekeurige hoge lengte-breedte verhouding worden bereikt, waardoor de vierkantsweerstand kan worden verlaagd zonder de transmissie en het extraheren van de lading dragers te beïnvloeden.

We hebben tot nu toe alleen het gemiddelde van het transmissie-spectrum

van de zilveren nanodraadroosters besproken. Deze op nanodraden gebaseerde TGM's bieden echter nieuwe mogelijkheden voor het controleren van het licht door hun nanofotonische aard in combinatie met de periodiciteit van de roosters. We hebben daarom in Hoofdstuk 5 de licht-materie interacties van deze zilveren nanodraadroosters beschreven. Hier bespraken we de oorzaak van de karakteristieke kenmerken in het transmissie-spectrum en hoe deze kunnen worden beïnvloed door de geometrie en de diëlektrische omgeving. We gebruikten numerieke simulaties om de transmissie en absorptie van licht door de roosters te berekenen, en verklaarden de experimentele waarnemingen. Bovendien hebben de simulaties de normalisatiemethode van Hoofdstuk 4 bevestigd, waarbij we de lichttransmissie door de zilveren nanodraadroosters ontkoppelen van die van het onderliggende substraat.

In het tweede deel van Hoofdstuk 5 werd het gebruik van in-situ microscopie beschreven om de nucleatie en groei van de zilveren nanodraadroosters te bestuderen. We hebben vastgesteld dat de zilveren nanodeeltjes licht sterk absorberen direct na nucleatie, wat resulteert in een plotselinge afname van de reflectie. Dit fenomeen werd waargenomen met behulp van microscopie en spectroscopie. Naarmate de nanodeeltjes groter worden en uiteindelijk een geheel vormen wordt er meer licht verstrooid, waardoor het roosterpatroon erg helder oplicht in de microscopiebeelden.

Onze resultaten tot dusver tonen aan dat de netwerken van zilveren nanodraden zeer transparant en geleidend zijn, waardoor ze geschikt zijn voor het gebruik van TGM's in PV-toepassingen. In Hoofdstuk 6 gingen we nog een stap verder door de zilveren nanodraadroosters te integreren in een zonnecel. We hebben de succesvolle productie van zilveren nanodraadroosters gedemonstreerd die rechtstreeks op een silicium gebaseerde zonnecel zijn gegroeid door middel van elektrochemische depositie zonder gebruik te maken van een initiële metaallaag. Om de transmissie van de zilveren nanodraadroosters in de juiste diëlektrische omgeving te meten via de kortsluitstroom (J_{sc}) hebben we tunnel-oxide passivated-contact (TOPCon) zonnecellen gebruikt als platform. Hiermee hebben we aangetoond dat de transmissie van de zilveren nanodraadroosters groter is dan verwacht op basis van hun geometrische voetafdruk. Bovendien hebben we het effect van de lengte-breedte verhouding van deze nanodraden op de hoek-afhankelijke kortsluitstroom onderzocht. We hebben vastgesteld dat de kortsluitstroom vrijwel constant is tot een invalshoek van ongeveer 40° , waarna de stroomdichtheid sterk afneemt. Deze afname van de stroomdichtheid wordt verklaard door de toename van absorptie in de zilveren nanodraadroosters. Over het algemeen heeft dit hoofdstuk de succesvolle integratie van de zilveren nanodraadroosters in op silicium gebaseerde zonnecellen laten zien, waarbij zelfs het rendement van de zonnecel verbeterd wordt in het nabij-infrarood.

Ten slotte hebben we in Hoofdstuk 7 het gebruik van monokristallijne zilveren nanokubussen onderzocht als kiemen voor de elektrochemische groei van de zilveren nanodraadroosters, die potentieel een hogere kristallijne kwaliteit hebben en dus betere elektrische prestaties. Een nanokubus-imprintlithografietechniek

die door onze partners was ontwikkeld, werd gebruikt om colloïdaal gegroeide monokristallijne zilveren nanokubussen met een grootte van 40 nm samen te rangschikken tot een rooster-achtig patroon op ITO-substraten. Vervolgens hebben we ons gericht op het samengroeien van deze zilveren nanokubussen door middel van elektrochemische overgroei. De kennis die we in Hoofdstuk 3 hebben opgedaan, is gebruikt om zilver selectief te groeien op de nanokubussen, zonder het creëren van nieuwe zilverkiemen op het ITO-substraat. We hebben indirect bewijs gevonden voor epitaxiale overgroei, aangezien de toename van de grootte van het kristal-domein zoals verkregen uit Röntgendiffractie overeenkomt met de toename van de grootte verkregen uit morfologische metingen (atomaire krachtmicroscopie, scanning electronmicroscopie). Daarnaast benadrukken onze bevindingen het cruciale belang van het verwijderen van de liganden voor de succesvolle overgroei en samenvoeging van de nanokubussen tot één geheel.

In dit proefschrift rapporteren we een schaalbare elektrochemische oppervlakte-selectieve methode voor het maken van onderling verbonden metalen nanostructuren voor het gebruik als transparante geleidende materialen. Het selectief opbouwende karakter van deze techniek maakt het mogelijk om nanodraden met een willekeurige hoge lengte-breedte verhouding te fabriceren. Daardoor kan de vierkantsweerstand worden verlaagd zonder de transmissie en het extraheren van de lading dragers te beïnvloeden. Deze eigenschap blijkt van groot belang voor het integreren van de zilveren nanodraadroosters in TOPCon-zonnecellen. Als zodanig draagt dit proefschrift bij aan een duurzamere zonne-energie infrastructuur, waardoor nieuwe mogelijkheden worden gecreëerd voor een toekomst met schonere en hernieuwbare energie.