

University of Groningen

Networks of Functional Metal Oxides Towards Neuromorphic Materials

Berg, Alexandra Irene

DOI:
[10.33612/diss.697740687](https://doi.org/10.33612/diss.697740687)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2023

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Berg, A. I. (2023). *Networks of Functional Metal Oxides Towards Neuromorphic Materials*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.697740687>

Copyright

Other than for strictly personal use, 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), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

SAMENVATTING

Kunstmatige intelligentie (KI) is de afgelopen jaren enorm in belang toegenomen, en dat gaat gepaard met een hoog energieverbruik dat nodig is voor de werking van de deep learning-netwerken. Eén manier om het stroomverbruik van deze systemen te verminderen is om af te stappen van berekeningen op Centrale Verwerkingseenheden (CVE), versneld door Grafische Verwerkingseenheden (GVE), en te kijken naar op de hersenen geïnspireerde (neuromorfische) hardware. De huidige neuromorfische chips presteren al beter dan conventionele computers wat betreft energieverbruik voor bepaalde taken (patroonherkenning), maar het grote aantal transistors dat voor deze chips nodig is om één neuron te emuleren, beperkt hun functionaliteit. Als alternatief, en om het stroomverbruik nog verder te verlagen, wordt onderzoek gedaan naar nieuwe materialen en nieuwe apparaatstructuren die verder gaan dan de traditionele Complementaire Metaal-Oxide-Halfgeleider (CMOS) architecturen. In dit werk onderzoeken wij de vorming van zelf-geassembleerde nanoschaalnetwerken van oxidematerialen, met de bedoeling rijkere, complexere en beter afstembare materialen te ontwikkelen, waaronder memristors. Om netwerken van verschillende metaaloxides te vormen, combineren we polymeer inprenting met polymeer sjablonen. **(Hoofdstuk 1)**

Hoofdstuk 2 beschrijft de experimentele methoden die in dit proefschrift gebruikt worden, zowel de algemene concepten als alle concrete experimentele parameters van elk proces. Daarnaast bespreekt dit hoofdstuk ook de problemen die zich voordeden tijdens het syntheseproces, en bevat het praktische aanbevelingen voor wie in deze richting wil werken.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de vooruitgang en het perspectief van polymeer templatng van multifunctionele oxide nanostructuren en bespreekt de innovatie van het veld op het moment dat dit werk werd gestart. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van hoe polymeer sjablonen een interessant alternatief biedt voor de fabricage van metaaloxide nanostructuren in vergelijking met andere traditionele methoden voor de fabricage van dunne film heterostructuren, zoals lithografie, gepulseerde laser depositie (PLD) en chemische oplossing depositie (CSD). Sjabloneren met behulp van sequentiële infiltratiesynthese (SIS) en CSD wordt besproken, evenals het gebruik van multiblokcopolymeren om complexe structuren te verkrijgen. Ten slotte wordt een vooruitblik gegeven op de voortgang van het vakgebied en interessante richtingen om te onderzoeken. Dit hoofdstuk is gebaseerd op het gepubliceerde artikel: Xu, Berg * J. Appl. Phys. **128**, 190903 (2020).

In hoofdstuk 4 laten we zien dat sterk geordende en onderling verbonden nanoschaalnetwerken van functionele metaaloxiden kunnen worden gemaakt door een combinatie van polymeer inprenten en polymeer sjablonen via COD. We doen verslag van de fabricage

*J. Xu en A.I. Berg hebben in gelijke mate aan dit werk bijgedragen.

van netwerken van BiFeO₃ (BFO), SrTiO₃ (STO), La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ (LCMO) en HfO₂, en laten zien dat al deze materialen de zelf-geassembleerde netwerk morfologie kunnen volgen die wordt bepaald door de polymeerstructuur. Deze netwerken werden uitgebreid gekarakteriseerd met verschillende technieken. *Grazing Incidence Small Angle X-ray Scattering (GISAXS)* toonde aan dat voor de gecombineerde netwerken een goede afdrukkwaliteit werd verkregen op de mm² schaal. De materiaalstoichiometrie werd onderzocht met röntgen foto-elektronenspectroscopie (XPS) en de kristalfasen werden gekarakteriseerd met *Grazing Incidence Wide Angle X-ray Scattering (GIWAXS)*. De elektronische functionaliteit van de materialen was zoals verwacht: Geleidende Atoomkrachtmicroscopie (*cAFM*) van de La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ netwerken bevestigde het geleidende karakter van deze samenstelling; en Piëzo-respons Atoomkrachtmicroscopie (*PFM*) van het BiFeO₃ netwerk is consistent met de aanwezigheid van ferro-elektrisch gedrag. Dit hoofdstuk is gebaseerd op het gepubliceerde artikel: Berg et al., *ACS Appl. Nano Mater.* **5**, 9, 13349-13360 (2022), en laat zien dat veel materialen binnen bereik liggen voor de gecombineerde inprint-en-sjabloneermethode en dat de gerapporteerde materialen veelbelovend zijn voor toekomstige toepassingen in aanpasbare elektronica.

Hoofdstuk 5 bespreekt de synthese en karakterisering van La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (LSMO)-structuren en biedt een perspectief op het potentiële gebruik van LSMO als geheugenmateriaal. LSMO heeft een rijk fasediagram, met overgangen tussen fasen die verschillende magnetische, structurele en elektrische transportkarakteristieken vertonen, als functie van de Sr-dotering, en vertoont een sterke koppeling tussen de magnetische en metaal-naar-isolator overgangstemperaturen (respectievelijk T-textsubscriptC) en T-textsubscriptMI), waardoor het bijzonder interessant is voor toepassingen. In dit hoofdstuk wordt onderzoek gedaan naar resistief schakelen in LSMO-nanostructuren, gefabriceerd door middel van CSD en polymeer sjablonen. Voor deze nanostructuren zijn de afmetingen verkleind in zowel de in- als de uit-vlaksrichting en wij bespreken de effecten die deze dimensionaliteitsvermindering heeft op de transporteigenschappen van de netwerken. Hieruit leiden wij af dat de kritische dikte moet worden overwonnen om materialen en apparaten te verkrijgen die geleiding kunnen vertonen bij kamertemperatuur. Daartoe werden verschillende meerlaagse structuren vervaardigd en besproken. Elektrische geleiding werd alleen waargenomen bij de dikst haalbare nanostructuren, met een totale dikte van ~20 nm. Voor deze monsters werden schakellussen met sterk gelijkrichtend gedrag waargenomen. De eerste *cAFM* studies tonen resistief schakelen en niet-vluchtig gedrag, hoewel het onderliggende mechanisme onduidelijk blijft.

Dit proefschrift wordt afgesloten met een **algemene vooruitblik** over de impact van dit werk en mijn visie op de volgende stappen die genomen moeten worden om het veld vooruit te helpen en een toekomst te creëren voor zelf-geassembleerde netwerken in neuromorfische toepassingen.