



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Reconstruction methods for combined HAADF-STEM and EDS tomography

Zhong, Z.

### Citation

Zhong, Z. (2018, December 10). *Reconstruction methods for combined HAADF-STEM and EDS tomography*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/67129>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/67129>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:

<http://hdl.handle.net/1887/67129>

**Author:** Zhong, Z.

**Title:** Reconstruction methods for combined HAADF-STEM and EDS tomography

**Issue Date:** 2018-12-10

# Samenvatting

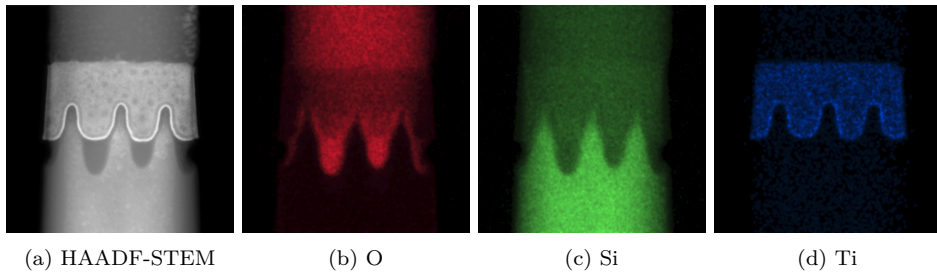
(*The English summary follows after the Dutch summary.*)

Tomografie is een niet-invasieve techniek waarmee beelden gemaakt kunnen worden van doorsnedes van een object. Deze doorsnedes worden berekend aan de hand van projectiebeelden die onder verschillende hoeken worden opgenomen. Deze techniek staat ook wel bekend als computertomografie (CT). Het principe achter tomografie kan toegepast worden op projectiebeelden die met verschillende beeldvormingstechnieken zijn opgenomen. Standaard CT, gebaseerd op Röntgenstraling, kan alleen structuren onderscheiden van tenminste honderd micrometer in grootte. In levenswetenschappen en materiaalwetenschappen is het van belang om structuren in beeld te brengen die slechts een paar atomen groot zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een computerchip, die structuren heeft van ongeveer 10 nanometer. Voor deze toepassingen wordt het principe van tomografie gecombineerd met elektronenmicroscopie (EM). Deze combinatie staat bekend als elektronentomografie (ET). EM maakt gebruik van versnelde elektronen, en met deze techniek kunnen atomaire structuren in beeld gebracht worden.

Het onderzoek in dit proefschrift richt zich op de tomografische reconstructie op basis van projectiebeelden die afkomstig zijn van twee verschillende EM modaliteiten. De eerste modaliteit is *high angle annular dark field scanning transmission microscopy* (HAADF-STEM), en de tweede modaliteit is *energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS). Figuur S1 toont voorbeelden van projectiebeelden opgenomen met respectievelijk HAADF-STEM en EDS. Tegenwoordig is HAADF-STEM een standaard modaliteit in EM, terwijl EDS soms gebruikt wordt als een aanvullende techniek om extra informatie te verzamelen over de chemische samenstelling van het onderzochte object. HAADF-STEM resulteert in beelden met een enkel kanaal die informatie van verschillende chemische elementen door elkaar mengt. Wanneer men gebruik maakt van standaard beeldvormingsmethodes, hebben HAADF-STEM beelden relatief lage ruisniveaus. In tegenstelling tot HAADF-STEM, leidt EDS tot een verzameling beelden, één voor elk van de afzonderlijke elementen. Deze EDS beelden hebben typisch hogere ruisniveaus. Het toepassen van tomografie op EDS afbeeldingen is uitdagender vergeleken met HAADF-STEM. Dit komt onder andere door de sterke Poissonruis, een beperkte hoeveelheid projectiehoeken, en een lange opnametijd.

Rekeninghoudend met de complementaire eigenschappen van de twee modaliteiten, stellen we in Hoofdstuk 2 een aanpak voor die elementspecifieke reconstructies uitvoert op basis van projectiebeelden afkomstig van zowel HAADF-STEM als EDS.

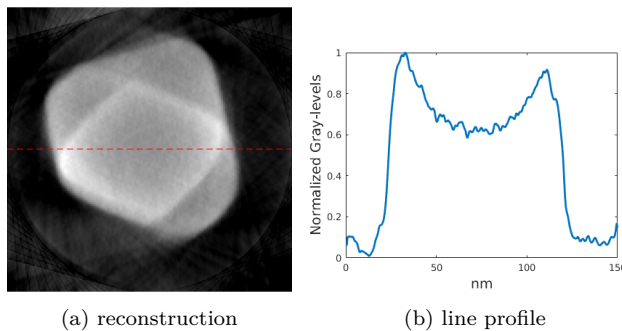
In deze aanpak worden de elementafhankelijke projectiebeelden opgenomen voor alle chemische elementen die in het object aanwezig zijn. In de praktijk kan het moeilijk zijn om al de hiervoor benodigde beelden op te nemen, door beperkingen van EDS opnametechnieken. Daarom stellen wij in Hoofdstuk 3 een



Figuur S1: (a): Een HAADF-STEM projectiebeeld van een halfgeleiderobject. (b) – (d): EDS projectiebeelden voor verschillende elementen uit hetzelfde object. [English: (a): HAADF-STEM projection image for a semiconductor sample. (b) - (d): EDS projection images for some chemical elements in the same sample.]

andere aanpak voor die projectiebeelden van de twee modaliteiten combineert. Deze techniek verbetert de elementspecifieke reconstructie, door het aanmoedigen van gedeelde randlocaties met de reconstructie gemaakt op basis van HAADF-STEM data.

Een sleutelprobleem bij het inbrengen van dergelijke informatie die *a priori* over het object bekend is, is hoe kan worden bepaald welke methode goed werkt voor een gegeven object. In Hoofdstuk 4 presenteren we een raamwerk voor het construeren van geavanceerde reconstructiemethodes, in de vorm van een *recept* dat rekening houdt met eigenschappen van het object en het scanproces. Dit leidt tot een verzameling richtlijnen voor het bepalen van een geschikte methode, afhankelijk van experimentele condities en het af te beelden object zelf.



Figuur S2: Bekervormige artefacten: (a) een gereconstrueerde doorsnede van een nanodeeltje. (b) intensiteiten overeenkomstig met de stippellijn in (a). De intensiteiten in het midden worden onderschat. [English: Cupping artifacts: (a) a slice of the reconstruction for a nanoparticle. (b) image intensities on the dashed line in (a). The image intensities in the center are underestimated.]

Het toepassen van ET op relatief dikke microscopie-samples is uitdagend, omdat in dit geval niet-lineaire effecten sterke invloed hebben op de HAADF-STEM data. Een consequentie is dat bekervormige artefacten zichtbaar zijn in de re-

constructiebeelden, wat er toe leidt dat intensiteiten in het midden van het reconstructiebeeld onderschat worden. Figuur S2 toont een dergelijk artefact in de reconstructie van een nanodeeltje. In Hoofdstuk 5 stellen we een algoritme voor dat dergelijke niet-lineaire effecten automatisch corrigeert, zodat de HAADF-STEM data gelineariseerd kan worden. Hierna kan deze data gebruikt worden voor tomografische reconstructie op basis van HAADF-STEM + EDS.

Samenvattend wordt in dit proefschrift een aantal technieken voorgesteld die een aanzienlijke verbetering kunnen geven ten opzicht van de gangbare reconstructiemethoden. De numerieke methoden kunnen toegepast worden op HAADF en EDS data die volgens gangbare technieken zijn opgenomen. Het is daarnaast mogelijk om op basis van de voorgestelde technieken de benodigde opnametijd van EDS data te verminderen. Een mogelijke toepassing van tomografie op basis van gecombineerde HAADF-STEM en EDS data, is het in beeld brengen van structuren in driedimensionale halfgeleidermaterialen. Dit maakt het onder andere mogelijk fabricagefouten te identificeren. Dit kan de verdere ontwikkeling van geavanceerde geïntegreerde schakelingen faciliteren.

## Summary

Tomography is a non-destructive technique for imaging slices (sectional images) of an object. The slices are computed from a series of projection images taken from different angles. This computation is known as tomographic reconstruction. The principle of tomography can be applied to different techniques for acquiring the projection images. For instance, the widely-used computed tomography (CT) for medical diagnostics is based on X-ray imaging. Standard X-ray CT can only resolve structures that are at least about one hundred micrometers in size. In the life sciences and materials science, the size of critical structures can sometimes be as small as a few atoms. For instance, the size of structures in computer chips is nowadays around 10 nanometers. In these fields, the principle of tomography is combined with electron microscopy (EM), a combination which is known as electron tomography (ET). EM uses accelerated electrons for imaging and can resolve structures at the atomic scale.

The research in this thesis is focused on tomographic reconstruction based on two imaging modalities in EM. The first modality is *high angle annular dark field scanning transmission microscopy* (HAADF-STEM), and the second modality is *energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS). Figure S1 shows examples of projection images acquired by HAADF-STEM and EDS. While HAADF-STEM is a standard modality in EM nowadays, EDS is sometimes used as a supplementary technique to resolve more chemical information. HAADF-STEM yields a single-channel image that mixes the information for all chemical elements. Using