



Openbaar Eindrapport Advanced NanoLayers

Gegevens project

- Projectnummer: TKIZ01001
- Projecttitel: Advanced NanoLayers
- Penvoerder en medeaanvragers:
 - ASM Europe B.V.
 - Technische Universiteit Eindhoven (TU/e)
 - Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)
- Projectperiode: 1-7-2012 t/m 31-12-2013



Samenvatting van uitgangspunten, doelstelling en samenwerkende partijen binnen het advanced nanolayer project

In het TKI project Advanced Nanolayers hebben ECN, TU/e en ASM samengewerkt aan dunne films en gerelateerde technologie voor kristallijn silicium zonnecellen. ASM is een Nederlandse machinebouwer voor de halfgeleiderindustrie en oriënteert zich tevens op de zonnecelmarkt. De Technische Universiteit van Eindhoven TU/e onderzoekt specifieke processen van de zonnecel fabricage (namelijk het passiveren van de gedoteerde oppervlaktes) op een fundamenteel niveau. ECN ontwerpt, modelleert en ontwikkelt cel concepten waarin alles geïntegreerd wordt. Dit project heeft een bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van nieuwe processen, zoals oppervlakte passiverende lagen (*films*) met atoomlaagdepositie, om de zonnecellefficiëntie verder te verhogen.

De doelen van het project, zoals omschreven in het projectplan, zijn als volgt samen te vatten:

- Ontwikkeling van stacks die op een ASM reactor geproduceerd kunnen worden (twee nanolaagjes van verschillende materialen) voor oppervlakte-passivering van zonnecellen en onderzoek naar onderliggende werkingsprincipes.
- Nieuwe materialen voor de passivering van oppervlakken en voor de ontwikkeling van gepassiveerde contacten in zonnecellen.
- Gecontroleerde doping-profielen met behulp van ion-implantatie.

Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

De resultaten van het project zijn gepresenteerd op diverse (inter-)nationale conferenties en workshops en ook gepubliceerd (zie ook het kopje “overzicht van openbare publicaties”). Hieronder volgt een korte samenvatting van deze resultaten.

Een atoomlaag depositie (ALD) proces voor SiO_2 is ontwikkeld aan de TU/e waarbij er gekeken is naar de invloed van verschillende procesparameters (zoals precursor-dosering, temperatuur, etc.) op de groeisnelheid. In een ideaal ALD proces verzadigt het oppervlak bij voldoende lange precursor doseringen waarbij de oppervlakte-reacties automatisch stoppen. Dit is een van de grote voordelen van ALD, omdat op deze manier zeer dunne laagjes te maken zijn en de uniformiteit over grote oppervlakten erg goed is en de laag uniform is onafhankelijk van de morfologie van het oppervlak. De invloed van proces condities op de oppervlaktepassivering is ook bestudeerd. De O_3 dosering bleek een belangrijke parameter te zijn voor “finetuning” van de passivatie-eigenschappen. Naast SiO_2 is er ook in detail gekeken naar de invloed van proces parameters voor Al_2O_3 passiveringslagen alsmede de invloed van voorafgaande schoonmaakstappen van de Si wafer. Een belangrijk resultaat is dat is aangetoond dat $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks ideaal zijn om de passivering van n+ gedoteerde silicium oppervlakken te optimaliseren. De dikte van de SiO_2 laag is daarbij een belangrijke parameter.

Vervolgens is het ALD SiO_2 proces ook ontwikkeld op een ASM reactor. Hiervoor zijn de nodige aanpassingen aan de hardware gedaan. Vervolgens is de invloed van een groot aantal procesparameters op de oppervlaktepassivering van zonnecellen onderzocht, zoals temperatuur en duur van ALD cycli. Een silicium nitride antireflectie-coating werd door ECN boven op de andere laagjes aangebracht. In zijn algemeenheid kan gesteld worden dat uiteindelijk de processen op de TU/e en bij ASM tot dezelfde goede resultaten hebben geleid. Een belangrijke observatie was dat de passiveringseigenschappen van de laagjes het meest verschillend waren voorafgaande aan de hoge temperatuurstap (die uitgevoerd werd bij ECN en vergelijkbaar is met het thermische budget benodigd voor het aanbrengen van de metaalcontacten op zonnecellen). Desalniettemin zorgen de stacks ook na deze temperatuurstap voor de beste passivering van n+ oppervlaktes in vergelijking met Al_2O_3 .



Daarnaast zijn $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks gebruikt om zowel de voor- als de achterkant van n-Pasha cellen te passiveren. Hoewel de gemiddelde efficiëntie iets lager uitviel bij deze eerste test, is de Voc – onder andere een maat voor de passivering - gelijk aan die van de referentiecel. Dit wijst erop dat de passivering van de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks in principe geschikt is om toe te passen op zowel n+ als p+ oppervlakten in zonnecellen.

Naast bovenstaande resultaten heeft de TU/e verder onderzoek gedaan naar de vaste lading en de “passiveringsmechanismen” van de verschillende passiverende laagstructuren. Daarbij zijn onder andere “corona lading” experimenten gebruikt. Op deze manier is de hypothese dat respectievelijk positieve en negatieve lading beter geschikt is voor n+ en p+ oppervlakten, experimenteel bevestigd.

ASM heeft daarnaast het ALD recept voor Al_2O_3 passivatie in een aantal iteraties verder geoptimaliseerd. Voor sommige type zonnecellen is het nodig slechts aan een kant van de cel te deponeren, en is depositie aan de voorkant niet gewenst (dit kan bijvoorbeeld zorgen voor minder lichtkoppeling). Er zijn succesvolle experimenten verricht om dit “wrap-around” effect beter te beheersen.

Verder is er nog gekeken naar de passivering van “nieuwe materialen” (althans nieuw voor zonneceltoepassingen) zoals ALD SiN_x en TiO_2 door de TU/e. Deze materialen brachten voornamelijk geen nieuwe voordelen aan het licht ten opzichte van de al bekende materialen. De opschaling en implementatie van deze materialen is daarom voornamelijk niet verder onderzocht.

Verder heeft ASM ook gekeken naar annealing/passivering en activering van geïmplanteerde ionen, zoals het effect van verschillende anneals op de oppervlakte weerstand en de doping profielen zoals gemeten door ECN.

Op de TU/e is ook onderzoek gedaan naar de invloed van het dopingprofiel (wat werd aangebracht door ECN) op de kwaliteit van de oppervlakte door Al_2O_3 . Het blijkt dat de passivering van het silicium oppervlak vrijwel onafhankelijk is van de mate van dotering, behalve wanneer een Boron-Silicium laag wordt gevormd tijdens het doteringsproces. Voor $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks is de passivering het best voor sterk gedoteerde oppervlakten.

Inmiddels gebruiken verschillende klanten de ALD reactor van ASM in het (pilot) productie proces van nieuwe generatie zonnecellen. Dit toont als beste aan dat de techniek concurrerend is met andere depositiemethodes zoals Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD). Zeker met de vernieuwde recepten met kortere tijdsduur en minder gasgebruik. Dit geldt ook voor de oxidatie/anneal recepten voor de geïmplanteerde wafers.

Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

De partners hebben in dit project samengewerkt om een aantal doelstellingen ten aanzien van proces ontwikkeling te realiseren en gerelateerd wetenschappelijk inzicht te genereren. Dit heeft ook mede geleid tot het publiceren van een aantal wetenschappelijke publicaties (zie de paragraaf “Overzicht van openbare publicaties”).

In een bredere maatschappelijke context kan worden gesteld dat zonne-energie een enorm potentieel heeft, aangezien het de mogelijkheid verschaft tot het volledig duurzaam opwekken van elektriciteit, zonder de uitstoot van schadelijke stoffen of andere significante nadelen. Aangezien zonne-energie een volledig veilige, schone, stille, kost effectieve en betrouwbare elektriciteitsproductie kan bieden, waarbij het individuen tot de beschikking stelt zelf elektriciteit op te wekken, zijn de mogelijkheden en maatschappelijke impact van een succesvolle implementatie groot.



Dankzij het Advanced Nanolayer project zijn er technologieën ontwikkeld, zoals bijvoorbeeld de goedkope en effectieve oppervlaktepassivering door Al_2O_3 , die dicht bij marktintroductie staan en die zullen leiden tot verdere daling van opwekkosten en hogere efficiëntie van zonnecellen. Er zullen daarom in het komende decennium omvangrijke zelfdragende markten voor PV kunnen ontstaan.

De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens het project hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost;

De zonnecelindustrie is zich nog steeds aan het herstellen van de nasleep van de financiële crisis en de onderlinge hevige concurrentiestrijd die de marges sterk heeft doen afnemen. Dit heeft ook gevolgen voor R&D waarbij de focus steeds sterker komt te liggen op korte termijn. Desalniettemin, heeft ASM een aantal processen getest in samenwerking met klanten. De “customer pull” m.b.t. tot nieuwe materialen was echter beperkt, en dit heeft ook de urgentie van een aantal experimenten in Advanced Nanolayers beïnvloed, zoals het opschalen van de allernieuwste materialen. In plaats van deze activiteiten, heeft ASM veel tijd gestoken in het optimaliseren van de reeds ontwikkelde processen (zoals Al_2O_3 en $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks), bijvoorbeeld door het sterk verkorten van de totale procestijd. Deze processen zijn reeds samen met klanten getest en toegepast binnen het parallel lopende TKI project Dutchness.

Spin off binnen en buiten de sector

Binnen de PV sector is het ALD stack proces overgebracht naar het lab van een van de grote zonnecelfabrikant, waarbij er gezamenlijk een R&D project is opgezet. Kortom, dit project heeft bijgedragen aan nieuwe commerciële initiatieven. De kennis uit dit project zou voor een deel interessant kunnen zijn voor andere toepassingsgebieden, bijv. in de halfgeleider industrie, waar ASM haar kernactiviteiten op richt.

Het verlagen van de kostprijs voor zonne-elektriciteit heeft invloed op de introductie van zonnepanelen in de gebouwde omgeving, waarbij consumenten steeds vaker kiezen voor installatie op hun daken. Dit heeft weer positieve invloed op de installatiesector voor PV-panelen en alles wat daarbij hoort (invertors, dakvernieuwing, etc.).

Overzicht van openbare publicaties

De resultaten zijn gepresenteerd en gepubliceerd op verschillende (internationale) conferenties, zoals een mondelinge presentatie op de Silicon PV in 's-Hertogenbosch (2014) en op de Amerikaanse AVS conferentie. Daarnaast zijn de resultaten ook getoond op de Europese Zonnecelconferenties in Parijs (2013) en Amsterdam (2014):

- B.W.H. van de Loo, G. Dingemans, E.H.A. Granneman, I.G. Romijn, G.J.M. Janssen, W.M.M. Kessels: “Advanced front-surface passivation schemes for industrial n-type silicon solar cells”, *Photovoltaics international* 24 (2014).
- B.W.H. van de Loo, H.C.M. Knoop, G. Dingemans, M. Lamers, I.G. Romijn, W.M.M. Kessels: “Zero-Charge’ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Stacks for the Simultaneous Passivation of n+ and p+ Surfaces in Solar Cells”, *Silicon PV conference 's-Hertogenbosch, 2014* (oral).
- B.W.H. van de Loo, H.C.M. Knoop, G. Dingemans, I.G. Romijn, M.W.P.E. Lamers, J. Liu, Y. Komatsu, W.M.M. Kessels: “Simultaneous Passivation of n+ and p+ diffused Silicon Surfaces by



Atomic Layer Deposition of Al_2O_3 and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Stacks”, EU PVSEC, Amsterdam, 22-26 September 2014 (poster).

- B.W.H. van de Loo, H.C.M. Knoops, G. Dingemans, I.G. Romijn, W.M.M. Kessels: “Excellent Chemical Passivation of p+ and n+ Surfaces of Silicon Solar Cells by Atomic Layer Deposition of Al_2O_3 and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Stacks, American Vacuum Society Conference in Baltimore, November 2014 (oral).
- B.W.H. van de Loo *et al.*, “Zero-charge” $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ stacks for the Simultaneous Passivation of n+ and p+ Doped Silicon Surfaces by Atomic Layer Deposition, submitted to Sol. Mat. (2015)
- G. Dingemans, D. Pierreux, W. Knaepen, P. Zagwijn, F. Huussen, W. J. Huisman, ALD and Oxidation in a High Throughput Vertical Furnace for Industrial Solar Cells, Europese Zonnecelconferentie Amsterdam (2014).

Meer exemplaren van dit rapport

Meer exemplaren van dit rapport kunnen digitaal worden verkregen via het hieronder genoemde contact.

Contact voor meer informatie

Meer informatie over dit project kan verkregen worden via:

- Prof. Erwin Kessels, Technische Universiteit Eindhoven, w.m.m.kessels@tue.nl
- Prof. Arthur Weeber, ECN Solar Energy, weeber@ecn.nl
- drs. Hessel Sprey, ASM Europe, hessel.sprey@asm.com

Subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, voor het TKI Solar Energy uitgevoerd door RVO.