



Openbaar Eindrapport FERROSI

Projectnummer EOSLT07036

W. Soppe, R. van Swaaij, J. van Krevel

Penvoerder: ECN

Mede aanvragers: TU Delft en Tata Steel Europe

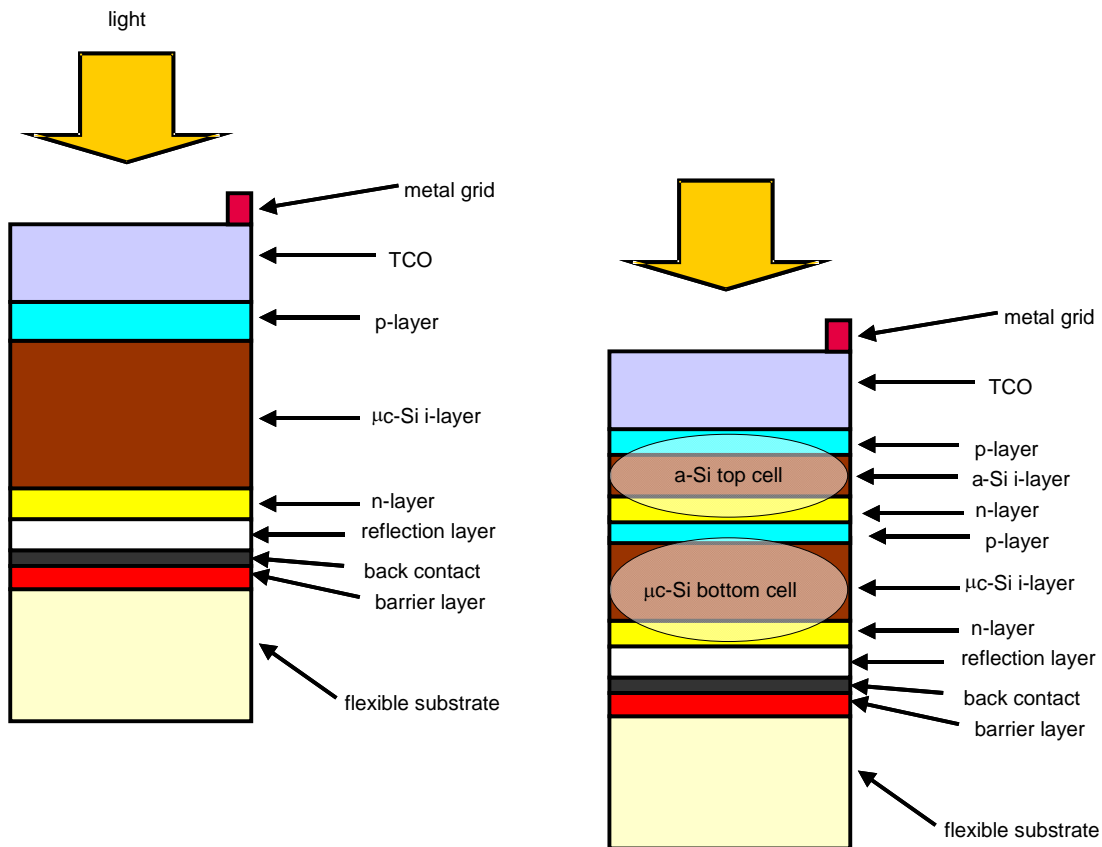
Verantwoording

Dit project is in een samenwerkingsverband van ECN (penvoerder), Tata Steel Europe en TU Delft uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, regeling EOS: Lange Termijn (uitgevoerd door Agentschap NL).

Contactpersoon
Dr. W.J. Soppe
ECN Zonne-energie
Postbus 1
1755 ZG Petten

1. Uitgangspunten en de doelstelling van het project

Het project FERROSI is gericht op de ontwikkeling van dunne film silicium zonnecellen op staalfolie. De generieke structuur van dergelijke cellen is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 1. Opbouw van enkelvoudige junctie (links) en tandem (rechts) dunne film silicium zonnecellen op folie. De lagen worden stap voor stap op het folie opgebouwd. Omdat de volgorde van de siliciumlagen n (fosfordotering), i (intrinsiek), p (boordotering) is, worden deze celconfiguraties met nip aangeduid.

De doelstelling van het project FERROSI is om hindernissen voor het gebruik van staalfolie voor dunne film PV uit de weg te ruimen door een aantal fundamenteel nieuwe voorbehandelingsmethoden te onderzoeken.

Na deze voorbehandeling moet de folie aan verschillende eisen voldoen:

- Het moet technisch mogelijk zijn om op grote oppervlakken zonnecellen met een hoog rendement op deze folies te realiseren. Hiervoor is het met name belangrijk dat de oppervlakteruwheid niet te groot is en dat er een goede oplossing voor de lichtopsluiting wordt gevonden.
- Het moet mogelijk zijn om monolithische serieschakeling van de zonnecellen aangebracht op de folie te realiseren. Hiervoor moet een elektrisch isolerende barrière laag op het staalfolie worden aangebracht. Een kosteneffectieve oplossing hiervoor is niet triviaal aangezien het niet eenvoudig is om op grote schaal pinhole-vrije lagen aan te brengen. De Amerikaanse onderneming Uni-Solar heeft tot nu toe geen goede oplossing hiervoor gevonden en produceert nog steeds film silicium PV modules op staalfolie, waarbij serieschakeling via een arbeidsintensief en duur proces gerealiseerd moet worden. Het staalfolie moet qua kosten een gunstig alternatief zijn voor andere folies, met name kunststoffolies. In deze kostenoverweging moeten nadrukkelijk alle kosten tot en met fabricage van het eindproduct worden meegenomen. Staalfolie heeft namelijk ten opzichte

van kunststoffolies het grote voordeel dat het een hermetische afdichting voor vocht biedt zodat de totale encapsulatiekosten veel lager kunnen zijn.

2. Behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

2.1 Resultaten

2.1.1 Staalfolie als substraat voor dunne film silicium zonnecellen

2.1.1.1 Alternatieven voor RVS folie

Er is een inventarisatie gemaakt van de oppervlakteruwheid van 10 verschillende staalfolies van Tata Steel, en die is vergeleken met die van het referentiemateriaal RVS. Uit deze inventarisatie bleek dat alle geselecteerde staalfolies een oppervlakteruwheid hadden die even goed of beter is dan de RVS referentie. Vervolgens zijn deze staalfolies getest op corrosiebestendigheid. Uit deze corrosietest kwamen twee zgn. nickel-annealed folies als meest geschikt naar voren.

2.1.2 Barrièrelagen

2.1.2.1 Elektrische isolatie

Er is een lijst van criteria gemaakt waaraan een barrièrelaag op staalfolie moet voldoen. Vervolgens is er bij ECN een begin gemaakt met het testen van verschillende warmte-uithardende sol-gel coatings. Er zijn enkele sol-gel coatings gevonden die aan de gestelde isolatie-eisen voldoen. Voor roll-to-roll toepassing zijn dergelijke warmte-uithardende lakken echter minder geschikt, vanwege de relatief lange droogtijd. Daarom heeft ECN gedurende het project de focus verschoven naar UV uithardende lakken, die een uithardtijd van enkele seconden hebben. Er is een familie van laksoorten geïdentificeerd, en vervolgens toegepast, die aan de gestelde isolatie-eisen voldoet.

Tata heeft twee sporen gevolgd om isolerende lagen aan te brengen op staalfolie. Het eerste spoor betreft een ontwikkeling die samen met de TU Delft is opgezet. De ontwikkeling heeft zich vooral gericht op het vervangen van milieu-onvriendelijke oplosmiddelen door water. Deze vervanging is uiteindelijk met succes geïntroduceerd.

Het tweede spoor betreft het aanbrengen van thermoplasten op staalfolie. De elektrische isolatie van deze lagen is voortreffelijk. Door middel van hot embossing kunnen deze lagen ook van een nanotextuur worden voorzien. De lagen hebben echter een beperkt temperatuurbereik voor verdere toepassing: boven de 180 °C vindt een structuurovergang plaats, die voor delaminatie zorgt. Het gewenste temperatuurbereik voor fabricage van dunne film Si zonnecellen is echter ongeveer 200 °C.

2.1.2.2 Hechting

De hechting van gesputterde lagen ZnO/Ag op de barrièrelaag is onderzocht. Op thermisch uithardende barrièrelagen was de hechting van meet af aan goed, voor UV lakken niet.

De hechting van ZnO/Ag op UV uithardende lakken is vervolgens verbeterd door het toepassen van een droge plasma-ets stap voor het aanbrengen van de ZnO/Ag laag.

2.1.2.3 Uitgassing

In de loop van het project is duidelijk geworden dat uitgassen van de barrièrelaag een belangrijk probleem kan vormen tijdens de vacuüm-depositieprocessen van de celfabricage. We hebben daarom veel aandacht moeten besteden aan a) het vinden van een goed meetmethode om de uitgassing te bepalen en b) het verbeteren van de lakken teneinde dit probleem zoveel mogelijk te reduceren. Uiteindelijk is bij Miplaza in Eindhoven een geschikte opstelling gevonden om het uitgassen van de gebruikte lakken goed te kwantificeren. De familie van UV uithardende lakken gevonden onder 4.2.1 voldoen aan de uitgasriteria.

2.1.3 Nanotexturering

TU Delft heeft gewerkt aan optische modellering om een ideale periodieke textuur in het achterzijde contact van zowel amorfe als microkristallijne dunne film nip cellen te kunnen bepalen. Dit heeft geleid tot een rapport “Theoretical investigation of optimal parameters of rectangular-like periodic texture for a-Si:H cells in substrate configuration” (Juni 2009) en twee publicaties: “Advanced light trapping techniques for thin-film silicon solar cells” en “Analysis and optimization of periodic interface textures in thin-film silicon solar cells” en “Optimal design of periodic surface texture for thin-film a-Si:H solar cells” (September 2010). In deze publicaties worden suggesties gedaan voor toe te passen periodieke texturen voor dunne film silicium zonnecellen. Enkele daarvan zijn ook in het project Ferrosi toegepast. Het project voorzag echter niet in de tijd en middelen om theorie en praktijk op dit gebied uitgebreid en systematisch met elkaar te vergelijken. Voor celfabricage zijn vooral “random” texturen toegepast.

2.1.4 Celfabricage

2.1.4.1 a-Si en μ c-Si nip cellen

TU Delft en ECN hebben Asahiglas (glas met een willekeurig getextureerd FTO) gebruikt als referentiesubstraat voor fabricage van nip cellen.

Op deze substraten hebben Delft en ECN (initiële) rendementen van respectievelijk 9,0% en 8,2% voor a-Si:H cellen en respectievelijk 6,4% en 5,8% voor μ c-Si:H cellen.

TU Delft heeft “nickel-annealed” staalfolie, zonder barrièrelaag gebruikt als standaard substraat voor zonnecellen op folie. ECN heeft RVS folie met UV uithardende lak gebruikt als standaard substraat. In de UV lak is via imprint een kopie van de Asahiglas textuur aangebracht. Deze textuur voldoet goed voor lichtopsluiting in a-Si:H cellen.

Op folie zijn de beste initiële rendementen van Delft en ECN respectievelijk: 6,9% en 9,0% voor a-Si cellen en 7,0% en 5,0% voor μ c-Si cellen. De hogere celrendementen voor de a-Si:H cellen op folie van ECN zijn waarschijnlijk te danken aan de aanwezigheid van de textuur. Omdat deze textuur niet ideaal is voor μ c-Si:H cellen, levert hij voor de μ c-Si:H cellen echter geen winst op. In vervolgprojecten wil ECN meer geschikte texturen voor μ c-Si:H cellen onderzoeken en toepassen.

2.1.4.2 a-Si/ μ c-Si tandem cellen

In de laatste fase van het project hebben TU Delft en ECN ook a-Si:H/ μ c-Si:H tandem cellen gefabriceerd.

Op glas zijn de beste rendementen van Delft en ECN respectievelijk: 9,4% en 9,2%. Alleen ECN is er aan toe gekomen om tandem cellen op folie te fabriceren. Het beste rendement dat hiervoor behaald is, is 8,4%.

2.1.5 Gebruikersonderzoek en kostenanalyse.

2.1.5.1 Gebruikersonderzoek AluplusSolar

Tata produceert sinds 2004 BIPV componenten onder de naam Kalzip® AluPlusSolar. Dit zijn aluminium dakprofielen (Kalzip®) die voorzien worden van flexibele dunne film Si PV modules afkomstig van UniSolar. Er is een intern onderzoek gedaan bij Tata om de ervaringen met dit produkt te evalueren. Een aantal van de belangrijkste conclusies zijn:

- a) de verlijming van Unisolar op aluminium is realiseerbaar
- b) montagebedrijven van dak en gevelproducten hanteren een marge over de inkoop van producten. Bij toepassing van PV geïntegreerde produkten dient aandacht besteed te worden aan deze marges.
- c) directe fabricage van dunne film zonnecellen op de bouwelementen lijkt ideaal, maar is niet realiseerbaar vanwege de stevigheid (dus niet-oprolbaarheid) van het huidig gebruikte laminaat.

- d) kostenbesparingen lijken mogelijk door de fabricage van (flexibele) PV modules te integreren met die van de dakelementen, waardoor met name qua encapsulatiekosten bespaard kan worden.

2.1.5.2 LCA studie

ECN heeft een lichte LCA studie gedaan aan het integrale fabricageproces van dunne film silicium zonnecellen op staalfolie. Als basis werd een reeds uitgevoerde studie genomen van het fabricageproces op RVS folie. In de nieuwe studie zijn alle aannames van de oude studie nog eens tegen het licht genomen en daar waar nodig verbeterd, en is geprobeerd door te rekenen wat het verschil zou zijn als “nickel annealed” staal folie in plaats van RVS folie zou worden toegepast. Het verslag van de studie is weergegeven in een rapport dat als “deliverable” van het project wordt opgeleverd. Belangrijkste conclusies van het rapport zijn dat de resultaten van het oude rapport nog recht overeind staan: de energie terugverdientijd van dunne film Si PV modules loopt uiteen van 1 jaar in Z-Europa tot 1,5 jaar in NW-Europa; en dat de fabricage van het staalfolie de belangrijkste energie-kostenpost is in de totale keten van substraat tot geencapsuleerde module (60 MJ/m² op een totaal van 225 MJ/m²). Vervanging van RVS folie door “nickel annealed” staal folie zal waarschijnlijk een energiebesparing opleveren, maar omdat de energiekosten van het “nickel platen” en “annealen” onvoldoende bekend zijn hebben we deze besparing niet kunnen kwantificeren.

2.1.5.3 Kostenanalyse

Zowel ECN als Tata Steel hebben een kostenanalyse gemaakt van de productie van dunne film silicium zonnecellen op staalfolie. Uitgangspunt bij deze berekeningen was een productie van 50 MWp/jaar. De belangrijkste kostenbepalende factoren blijken cel/module rendement en de doorvoersnelheid – van met name het PECVD proces voor het maken van de silicium absorber lagen – te zijn. Verder kan een verbreding van de strip bijdragen tot een reducering van de kosten. Bij celrendementen hoger dan 10% en bij realistische aannames voor de depositiesnelheid van de siliciumlagen, zijn fabricagekosten op modulenniveau van minder dan 1 €/Wp realiseerbaar.

2.2 Knelpunten

Door vertraging bij het werven van personeel voor dit project, zijn de werkzaamheden bij Dimes met vertraging begonnen (feitelijk per 1 december 2008). Deze vertraging kon onvoldoende worden ingelopen zodat we verlenging van het project met zes maanden hebben aangevraagd en verkregen.

Belangrijke technische knelpunten hebben zich niet voorgedaan.

2.3 Perspectief voor toepassing

De belangrijkste doelstellingen die we voor het project FERROSI hadden opgesteld zijn gerealiseerd.

- er zijn goedkopere alternatieven voor RVS folie als substraat voor dunne film silicium zonnecellen geïdentificeerd en op succesvolle wijze toegepast in zonnecellen.
- we hebben laten zien dat nanotexturering van een elektrisch isolerende barrièrelaag op staalfolie mogelijk is.
- er zijn celrendementen van 9% behaald voor dunne film silicium cellen op folie.
- het concept van dunne film silicium zonnecellen op staalfolie maakt moduleprijzen van minder dan 1 €/Wp mogelijk met de huidige technologie, modulerendementen van 10% of meer gerealiseerd kunnen worden.

Om de projectresultaten ook succesvol te implementeren in de PV industrie zijn er nog een aantal vervolgstappen nodig:

- toepassing van optimale periodieke nanotexturering voor lichtopsluiting. In FERROSI hebben we aangetoond dat we willekeurige en periodieke structuren kunnen aanbrengen, maar voor de celfabricage zijn alleen willekeurige texturen gebruikt. Met name voor microkristallijne en micromorfe tandemcellen verwachten we nog een flinke winst in celrendement te kunnen boeken door optimale periodiek structuren voor lichtopsluiting te gebruiken.
- verhoging van de celrendementen. Zoals gezegd verwachten we door optimale periodieke texturen toe te passen hogere rendementen voor $\mu\text{c-Si:H}$ en $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ tandem cellen te bereiken. Verdere verbetering kan behaald worden door optimalisatie van de absorberende lagen, het TCO aan de voorzijde en door toepassing van een reflectorlaag tussen top en bodemcel.
- fabricage van (mini)modules om de werking van het interconnectieconcept en de barrièrelaag te demonstreren.

3. Bijdrage van het project aan de doelstellingen van het Programma (duurzame energiehouding, versterking van de kennispositie)

3.1 De bijdrage aan een duurzame energiehouding:

3.1.1 De bijdrage van dit project aan de doelstellingen van het desbetreffende onderzoeks- programma (speerpunt/kennisimportthema).

Dit project heeft betrekking op het onderzoeksprogramma ‘Gebouwde Omgeving’ en in het bijzonder op het speerpunt “Dunne-film PV-technologie”. De lange termijn doelstelling van het Energie Onderzoek Subsidie – Lange Termijn programma is/was om voorwaarden te scheppen voor PV module kostprijzen van 1 €/Wp in 2020 met een rendement van 15% of meer. Het project FERROSI richt zich op de ontwikkeling van dunne film silicium zonnecellen op staalfolie. In het project zijn zowel het kostenaspect als het rendementsaspect aangepakt. In het project hebben we aangetoond dat bij module rendementen van 10% en meer de module kostprijzen voor dunne film silicium zonnecellen op staalfolie beneden de 1 €/Wp realiseerbaar zijn. In het project hebben we celrendementen van 9% behaald en de verwachting is dat we op korte termijn (dit jaar of volgend jaar), door toepassing van optimale texturen celrendementen van meer dan 10% gaan realiseren. De stap naar module rendementen van 15% is daarmee nog fors en zal tot 2020 nog een flinke ontwikkeling vergen. Hierbij valt te denken aan verdere verbetering van de lichtopsluiting, toepassing van plasmonische structuren om nog dunnere absorberende lagen mogelijk te maken en triple-junction cellen om een nog breder gedeelte van het zonlichtspectrum in te vangen.

3.1.2 De bijdrage aan een technologische doorbraak of innovatie in een internationaal perspectief.

Met name het nanotextureringsconcept heeft veel (internationale) aandacht getrokken. Het concept is niet alleen toepasbaar op staalfolie maar ook op glas en is niet alleen geschikt voor dunne film Si PV, maar ook voor CIGS en OPV.

3.1.3 De strategische visie op het implementatietraject van de onderzoeksresultaten en de verwachtingen over toekomstige voortzetting van de ingezette onderzoekslijn.

De onderzoek- en ontwikkelingsactiviteiten van de dunne film groep van ECN zullen in de loop van 2012 onderdeel gaan vormen van het Solliance initiatief in Eindhoven. Binnen Solliance zullen deeltechnologieën als nanotexturering, maar ook het totaalconcept van dunne film siliciumzonnecellen op folie, verder ontwikkeld worden voor zover daar ook industriële draagkracht voor is. Op het gebied van nanotexturering is er al concrete industriële belangstelling om dit concept op glas verder te ontwikkelen.

Tata Steel beraadt zich op dit moment nog op zijn strategie tav PV.

3.2 De versterking van de kennispositie van Nederland:

3.2.1 De bijgedragen aan de versterking van kennis, kunde of onderzoeksfaciliteiten in Nederland.

Het project FERROSI heeft op de volgende manieren bijgedragen aan de versterking van de kennispositie in Nederland:

a) opleiding van dunne film PV specialisten bij de TU Delft en ECN,

- b) scholing in PV en bijbehorende vacuümprocessen van Tata Steel medewerkers bij de TU Delft,
- c) verbreding van expertise (en markt!) van Nederlandse lakkenfabrikant, verantwoordelijk voor levering van lakken voor barrièrelagen,
- d) versterking van de kennis en kunde van de medewerkers van de dunne film PV groep bij ECN.

3.2.2 Overzicht van openbare publicaties.

Publicaties:

1. Aken, B.B. van; Dörenkämper, M.S.; Devilee, C.; Heijna, M.; Löffler, J.; Soppe, W.J.; Roll to roll fabrication process of thin film silicon solar cells on steel foil ECN-M--09-077 juni 2009; 5p. Gepresenteerd op 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, USA, 7-12 juni 2009.
2. W. J. Soppe, H. Borg, B.B. van Aken, C. Devilee, M. Dörenkämper, M. Goris, M.C.R. Heijna, J. Löffler and P. Peeters: " Roll to roll fabrication of thin film silicon solar cells on nano-textured substrates. Gepresenteerd op de INEC2010 conferentie in Hong Kong, Januari 2010.
3. Aken, B.B. van; Devilee, C.; Dörenkämper, M.S.; Heijna, M.; Löffler, J.; Soppe, W.J. "Inline processed flexible thin film silicon solar cells using linear PECVD sources", Gepresenteerd op: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 september 2010.
4. Heijna, M.; Goris, M.J.A.A.; Soppe, W.J.; Schipper, W.; Wilde, R.; "Roll to roll nanotexturization of layers on steel foil substrates for NIP silicon solar cells" Gepresenteerd op: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 september 2010.
5. Heijna, M.; Löffler, J.; Aken, B.B. van; Soppe, W.J.; "Embossing of light trapping patterns in sol-gel coatings for thin film silicon solar cells" Gepresenteerd op: SPIE Optics & Photonics Conference, San Diego, USA, 12-14 augustus 2008.
6. Soppe, W.J.; Aken, B.B. van; Dörenkämper, M.S.; Devilee, C.; Heijna, M.; Löffler, J.; "Roll to roll fabrication process of thin film silicon solar cells on steel foil" Gepresenteerd op: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 21-25 september 2009.
7. Agbo, S. N.; Dorbrovolskiy, S.; Wegh, G.; Swaaij, R. A. C. M. M. van; Tichelaar, F. D.; Sutta, P.; Zeman, M.; "Strudtural analyses of seeded thin-film microcrystalline silicon solar cells", to be submitted.
8. Agbo, S. N.; Krc J.; Swaaij R. A. C. M. M. van; Zeman M.; "Optimization of the p-i interface properties in thin film microcrystalline silicon solar cell", Sol. Energy Mater. Sol. Cell **94**, 1864 (2010).
9. Agbo, S. N.; Swaaij, R. A. C. M. M. van; Zeman, M.; "Effect of seeding on the material property of $\mu\text{c-Si:H}$ absorber layer and the spectral response of the $\mu\text{c-Si:H}$ solar cell", Gepresenteerd op: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 september 2010.
 10. Campa A.; Isabella, O.; Erven, R. van; Peeters, P.; Borg, H.; Krc, J.; Topic, M.; Zeman, M.; "Optimal design of periodic surface texture for thin-film a-Si:H solar cells", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **8** (30), 160-167 (2010).
 11. Isabella, O.; Zeman, M.; Krc, J.; Topic, M.; "Advanced light trapping techniques for thin-film silicon solar cells", Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (pp. 3273-3279), Valencia, Spain (ISBN 3-936338-26-4).

