

Openbaar eindrapport TKI toeslag project LOLOSS PV

Datum rapport: 10 april 2018

Datum vrijgave publiek rapport: 30 juni 2018

Uitgangspunten en doelstellingen van project en partners

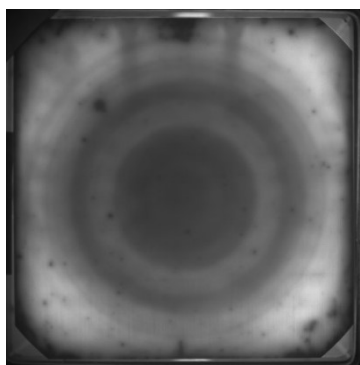


Fig. 1: Luminescentiebeeld van een silicium wafer met ring defecten.

Een bekend probleem in het productieproces van kristallijn silicium zonnecellen is het ontstaan van zogeheten 'ringdefecten' in de silicium wafer. Deze defecten, die hun naam danken aan het typische ringpatroon dat ze vormen in fotoluminescentie afbeeldingen van de wafer (zie afbeelding links), zorgen ervoor dat niet alle door het zonlicht gegenereerde stroom de zonnecelcontacten kan bereiken. Het rendement van de zonnecel is daardoor aanzienlijk minder, tot wel 3% absoluut (ongeveer 15% relatief). Het verschil met cellen zonder ringdefecten is zo groot, dat deze zonnecellen nog voor de moduleproductie worden uitgeselecteerd als afval of in minder waardevolle B-klasse modules geplaatst worden, wat een flink

productieverlies voor een zonnecellijn betekent. Tot wel 10% van alle wafers is vatbaar voor vorming van ringdefecten, de mate van vorming is echter afhankelijk van het gebruikte productieproces.

De hoofddoelstelling van het LOLOSS PV project was om een zo goed mogelijke oplossing te vinden voor de productieverliezen die ontstaan door de vorming van ringdefecten. De focus lag hierbij specifiek op detectie en mitigatie van ringdefecten in het n-Pasha proces. n-Pasha is een industrieel productieproces voor zogenaamde n-PERT zonnecellen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van n-type mono-kristallijne silicium wafers als basis materiaal. Dit proces wordt door de twee Nederlandse partners Tempress en ECN samen vermarkt. Het bieden van een oplossing voor het ringdefecten probleem betekent voor Tempress en ECN een verbetering van de marktwaarde van dit proces. Voor Aescusoft en SINTEF, lag de focus vooral op pre-proces detectie van ringdefecten en het ontwikkelen van de detectieapparatuur samen met ECN. Het hoofddoel van Norwegian Crystals was het verkennen van de grenzen van hun materiaal specificaties voor n-PERT processen in het algemeen.

Resultaten

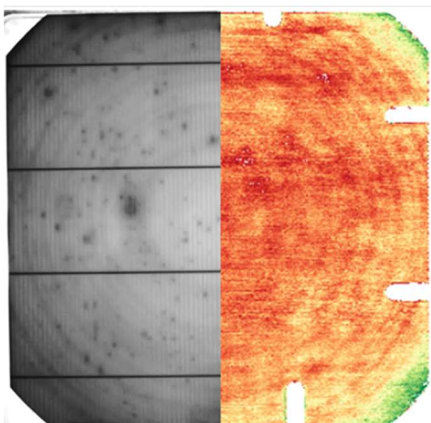


Fig. 2: Links: ringpatroon in fotoluminescentie beeld van een zonnecel. Rechts: voorspeld ringpatroon op basis van detectiesoftware.

De omvang van het probleem: ingot-inspectie

Wafers van enkele silicium ingots, gesorteerd op basis van hun positie in de ingot, zijn geïnspecteerd op ringdefecten na blootstelling aan delen van het zonnecel productieproces. Uit deze inspectie volgde dat 10% van de ingot, ook tot slechte zonnecellen zal leiden. Deze wafers kwamen doorgaans uit de top van de ingot, waar de zuurstof concentratie het hoogst is, echter ook in andere delen van de ingot werden (sterkere) ringpatronen gevonden.

Voorspellen van ringdefecten in wafers

Oppervlakteweerstandsscans zijn vergeleken met fotoluminescentie beelden na het zonnecel productie proces voor dezelfde wafers. Op basis van deze scans kon de vorming van ring patronen voorspeld worden. ECN heeft in het project speciale software ontwikkeld om deze analyse te automatiseren en trends te herkennen. De software maakt pre-proces classificatie van wafers met en zonder ringdefecten mogelijk met een geschatte nauwkeurigheid van 95%. Daarnaast is er ook een eerste aanzet gemaakt voor ringpredictie software gebaseerd op neural networks, welke het predictieproces kan versnellen en een parameter aan de sterkte van het ring patroon kan toekennen, waardoor het industrieel toepasbaar wordt. Ontwikkeling van de bijbehorende hardware en verdere optimalisatie van de analyse software zal in een vervolgproject plaatsvinden.

Vorming van ringdefecten in het zonnecelproces

Ringdefecten worden gevormd tijdens de hoge temperatuur fosfor- en boordiffusie stappen. Voor deze hoge temperatuurstappen zijn de ringen niet zichtbaar in fotoluminescentie beelden (zie Fig. 1).

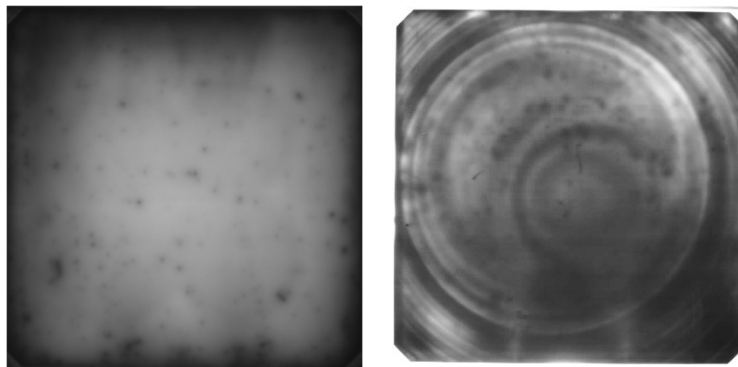


Fig. 1: Links: wafer met ringdefecten van nucleatiezijde zonder diffusiestappen gepassiveerd met amorf silicium. Rechts: nabur wafer met ringdefecten na boordiffusie gepassiveerd met amorf silicium.

In het LOLOSS project is aangetoond dat ringdefecten kunnen worden versterkt door recombinatie actieve onzuiverheden in de chemische stappen, die in de wafer kunnen diffunderen bij de hoge temperatuur stappen, en kunnen worden verminderd door interactie met de silicium nitride coating voor passivatie en antireflectie. Het aanbrengen van de silicium nitride coating heeft echter, naast het verminderen van het ring patroon, over het algemeen een verslechterende invloed op de kwaliteit van de wafer, wat de uiteindelijke waarde limiteert.

Aanpassing van hoge temperatuur stappen ter voorkoming van ringdefecten

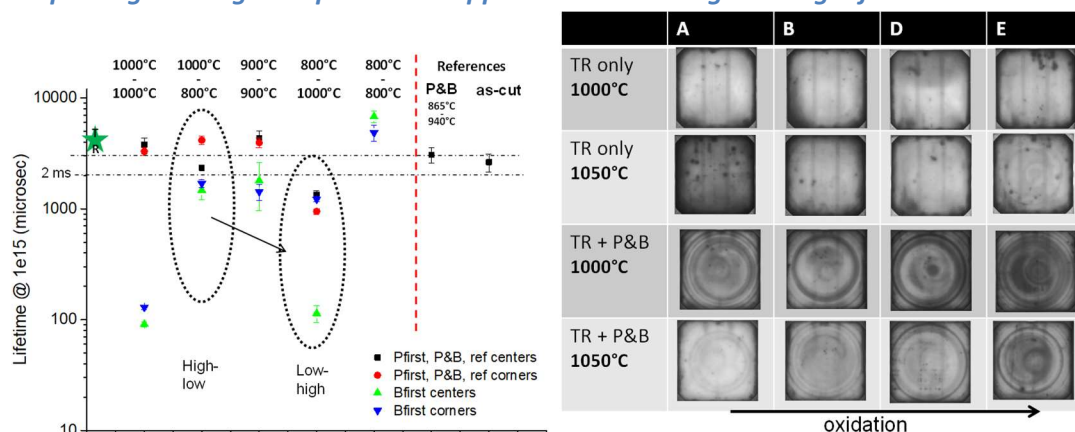


Fig. 3: Links: resultaat van tests met verschillende temperaturen en volgorde van diffusies. Hoog-laag en fosfor eerst geven de beste resultaten. Rechts: resultaat van Tabula Rasa tests. N₂ geeft minste ringen, maar bulk verslechtering.

Tests zijn uitgevoerd waarin de volgorde en de temperaturen van de diffusiestappen zijn gevarieerd (Fig. 3). Het ringpatroon lijkt globaal sterker naarmate er meer hoge temperatuurstappen zijn uitgevoerd en de maximale temperatuur hoger is. Echter, als we naar de details kijken, dan maakt het uit welke stappen bij welke temperaturen zijn uitgevoerd. Bij meerdere diffusie stappen zijn de resultaten beter als eerst de diffusie stap met de hoogste temperatuur wordt gedaan. Ook zijn de resultaten beter als eerst de fosfordiffusie is gedaan. De beste processen voor de wafers met ringen komen overeen met de beste processen voor wafers zonder ringen. Dit biedt aanknopingspunten voor een aangepast, verbeterd zonnecelproces dat op alle wafers toegepast kan worden.

Beginnen met een zeer hoge temperatuurstap $> 1000^{\circ}\text{C}$ voorafgaand aan de P en B diffusies, zou de zuurstofclusters volledig kunnen oplossen, en daarmee de vorming van ringen kunnen voorkomen. Dit is een bekende aanpak in de IC industrie en wordt Tabula Rasa genoemd.

Na alleen de Tabula Rasa stap in verschillende mengsels van stikstof en zuurstof zijn de ring defecten nauwelijks zichtbaar (Fig. 3). De waferkwaliteit neemt wel af, mogelijk worden bij deze hoge temperaturen ook clusters van andere onzuiverheden opgelost. Hoe hoger de temperatuur en hoe minder zuurstof tijdens de Tabula Rasa stap, hoe minder het ringpatroon verschijnt als vervolgens ook de andere diffusiestappen worden gedaan. Minder zuurstof betekent echter meer stikstof, wat bij hoge temperatuur de waferkwaliteit vermindert. Dit wordt door de vervolgstappen niet gerepareerd en begrenst de levensduur voor alle wafers op zo'n 4 ms. Voor de wafers zonder ringen is dit lager dan de waarde zonder Tabula Rasa, terwijl de Tabula Rasa in zuurstof hier winst oplevert. De Tabula Rasa behandeling kan dus niet op alle wafers toegepast worden.

Post-process behandeling voor het elimineren van ringdefecten (hydrogenatie)

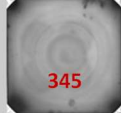
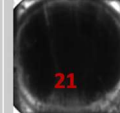
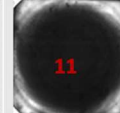
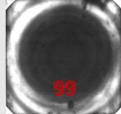
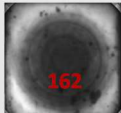
Disc wafers	a-Si:H 200°C	SiN _x 375°C	AlO _x + 500°C PDA
Not exposed to NH ₃ plasma			
Exposed to NH ₃ plasma			
After short firing step (~650°C for ~1 min)			
After NH ₃ plasma with coating			Lifetime in center in μs

Fig. 4: Fotoluminescentie beelden van wafers met sterke ringpatronen na het aanbrengen van verschillende coatings, bij verschillende temperaturen, en post-depositie behandelingen aan het eind van het n-Pasha proces.

In Fig. 4 is het effect van verschillende coatings op de waferkwaliteit te zien. Het aanbrengen van a-Si:H of AlO_x, levert geen vermindering van het ringpatroon op. Aanbrengen van SiN_x is wel effectief. Een NH₃ plasma behandeling voor de passiverende coating is nog effectiever dan SiN_x, maar helaas niet stabiel bij de korte verhittingsstap die toegepast wordt voor het uitharden van de metaalprintlijnen. Na de passiverende coating is de behandeling echter alleen effectief voor zwakkere ringpatronen en vermindert het de levensduur van goede kwaliteit silicium. Ook

dit proces is daarom niet geschikt voor alle wafers.

Conclusie: een eerste beeld van een geïntegreerde oplossing

Een kostenmodel is gemaakt voor de verschillende oplossingen. Over het geheel genomen lijkt de toename in productiviteit door het redden van wafers met ringen de dominante factor en zijn de extra kosten van de geïntroduceerde oplossingen verwaarloosbaar. Een productieproces met aangepaste diffusies, ook toepasbaar voor goede wafers, is het meest aantrekkelijk maar wellicht niet haalbaar. Voor aanvang van het zonnecelproces wafers met ringpatronen vervangen is haalbaarder en bijna net zo winstgevend.

Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de TKI Urban Energy

De doelstellingen van de TKI Urban Energy zijn een duurzame energiehuishouding en versterking van de kennispositie. Het LOLOSS PV project heeft hieraan bijgedragen middels het genereren van Nederlandse kennis om de productiviteit van zonnecel productielijnen te verhogen. Productielijnen met een hogere productiviteit produceren meer zonnepanelen per jaar met minder materiaalverliezen, waardoor de prijs van zonne-energie lager wordt.

In het LOLOSS PV project zijn oplossingen gevonden waarbij tot 98% van alle wafers met ring defecten ofwel uitgeselecteerd kunnen worden, ofwel verbeterd kunnen worden door een aanpassing van het zonnecelproces. Een dergelijke verhoging van de productiviteit kan een besparing in kosten van zonnepanelen tot meer dan 10% relatief in Euro/Wp opleveren (zie Fig. 5).

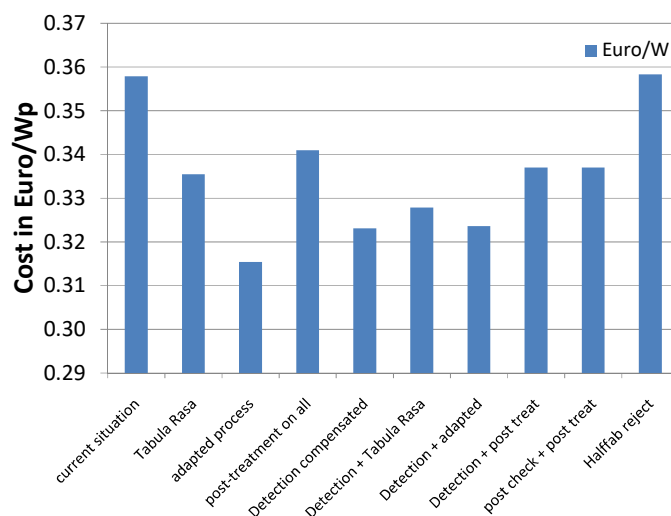


Fig. 5: Invloed op totale productiekosten voor de verschillende oplossingen ontwikkeld in dit project in Euro/Wp.

Overzicht van openbare publicaties

Er zijn 2 openbare publicaties verschenen over het werk aan passivatie van ringdefecten in het 3^{de} werkpakket. Daarnaast zijn er conferentiepresentaties zonder proceedings gegeven over enkele proces variaties (n-Pasha proces en Tabula Rasa).

Lijst van publicaties:

- P. Manshanden, P.C.P. Bronsveld and G. Coletti, **Hydrogenation of striation rings in n-type silicon wafers**, Proceedings of the 31st European PV Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 2015, p. 581-585
- P.C.P. Bronsveld, P. Manshanden, A. Gutjahr, M. Koppes, G. Coletti, I.G. Romijn, **The effect of n-Pasha processing on bulk wafer quality**, oral presentation at the 31st European PV Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 2015. No proceedings. Slides available through 1st author.
- Petra Manshanden, Paula C.P. Bronsveld, **Investigation of hydrogenation in n-type wafers with ring- and disc-shaped defect zones**, Proceedings of the 6th International Conference on Silicon Photovoltaics, Chambéry, France. Energy Procedia 92, 2016, p.857-866
- P.C.P. Bronsveld, M.Koppes, I.G. Romijn, A. Vlooswijk, P. Venema, **Defect formation and mitigation in high temperature n-type processing: Tabula Rasa**, oral presentation at the 7th nPV workshop, Freiburg, Germany, 2017. No proceedings. Slides available through 1st author.

Contactpersonen voor meer informatie

Peter Venema
Tempress B.V.
Radeweg 31
8171 MD Vaassen
Tel: 0578 699 200

Paula Bronsveld
ECN
Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Tel: 088 515 4331

Meer exemplaren van dit rapport zijn verkrijgbaar via het secretariaat van ECN Solar Energy (solarenergy@ecn.nl).

Subsidieregeling

Het project is uitgevoerd met TKI toeslag subsidie van het Ministerie van Economische Zaken voor TKI Urban Energy, Topsector Energie.