

Voor Lichttransmissie Geoptimaliseerd Afdek materiaal voor Zonnecollectoren en Zonnecellen

Eindrapportage

Dr. P.J. Sonneveld, Ir. G.L.A.M. Swinkels, Dr. J.K.Rath en Prof. G.P.A. Bot

Onderzoek in het kader van NEO/SenterNovem

Uitgevoerd door:

In opdracht van:



Universiteit Utrecht

ZEN SOLAR 

 SenterNovem

Colophon

Title	Voor Lichttransmissie Geoptimaliseerd Afdek materiaal voor Zonnecollectoren en Zonnecellen
Author(s)	P. J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, Dr. J.K.Rath en G.P.A. Bot
A&F number	R.485
ISBN-number	ISBN 90-6754-938-X
Date of publication	Augustus 2005
Confidentiality	Ja
Project code.	SenterNovem: 0268-02-03-04-0007, A&F: 630.54001.01

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: info.agrotechnologyandfood@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Samenvatting

In dit project is onderzocht of het voor kassen ontwikkelde hoogtransparante zigzagvormige afdekkingsmateriaal geschikt is als transparant afdekkingsmateriaal voor zonnecollectoren en zonnecellen. De huidige zonnecollectoren en zonnecellen zijn voorzien van een vlakke afdekking in de vorm van enkel glas, enkellaags kunststof en dubbellaags kunststof (alleen zonnecollector-en). De afdekking voor zonnecollectoren kan in een enkellaags en dubbellaags variant uitgevoerd worden. Een rendementsverhoging door de enkellaags variant is mogelijk met dit nieuwe type zigzagafdekking omdat dit een hogere lichttransmissie heeft, waardoor over het gehele bruikbare golflengtegebied meer zonlicht doorgelaten wordt. Naast de hogere lichttransmissie kan tevens een sterker materiaal ontstaan. De dubbellaags variant biedt voordelen voor zonnecollectoren door een hogere warmte-isolatie in combinatie met een gelijkblijvende lichtdoorlatendheid. Dit is aangetoond met lichttransmissie metingen voor het golflengte gebied van 400-700nm en voor het gebied 300-2500nm (UV-VIS-IR). Hoewel verhoging van de warmte-isolatie van transparante materialen bijna altijd gepaard gaat met vermindering van de lichttransmissie kunnen de warmteverliezen naar de buitenlucht afnemen met toepassing van een dubbellaags zigzagvormig materiaal met een vergelijkbare lichttransmissie.

In dit onderzoek is gebleken dat het standaard zigzag polycarbonaat materiaal zoals gebruikt in kassen niet altijd geschikt is voor zonnecollectoren en fotovoltaïsche cellen. Bij zonnecollectoren kan een kunststof afdekkingsmateriaal problemen geven door het optreden van hoge stagnatie temperaturen. Uit de praktijk metingen blijkt dat het zigzag materiaal ontwikkeld voor kassen minder geschikt is voor zonnecollectoren omdat de grote luchtkamers minder goed isoleren. Met kleinere luchtkamers is de verhoogde opbrengst in de praktijk wel haalbaar. Tevens bleek dat bij grotere invalshoeken dwars op de zigzagstructuur een hogere lichttransmissie resulteert in een hogere opbrengst.

Bij fotovoltaïsche cellen is de grote hoogte van het materiaal van 40-70 mm een probleem om gelijkmatig een dunne laag op het oppervlak te laten aangroeien. Daarom is een nieuw concept plaat- en folie-afdekking ontwikkeld met een veel kleinere zigzagstructuur die Micro-V vormgeving genoemd wordt. Dit nieuwe afdekkingsmateriaal is toe te passen voor zonnecollectoren en foto-voltaïsche cellen.

Raytracing berekeningen voor zonnecollectoren tonen aan dat met Micro-V dezelfde lichttransmissieverhoging bereikt kan worden als bij zigzag materiaal namelijk 6 % verhoging over het gehele zonnenspectrum ten opzichte van afdekking met een vlakke plaat. Voor hoge temperatuur toepassingen van zonnecollectoren kan het momentane rendement toenemen tot 50 % met een dubbele afdekking door de hogere isolatiewaarde met behoud van de lichttransmissie. Aan de hand van simulatieberekeningen is een jaarlijkse extra opbrengst van 4

% voor zonnecollectoren bepaald door in plaats van standaard glas een Micro-V materiaal toe te passen. Met dubbel Micro-V glas is de jaarlijkse extra opbrengst 9 % door de hogere isolatie waarde.

Voor loodrecht opvallende straling op PV cellen ligt de optimale V-hoek tussen de 40° en 50°. Bij diffuus opvallende straling is de optimale hoek groter en ligt tussen de 60° en 80°. Bij dunnere cellen (500nm) is de rendementverbetering hoger dan bij de dikkere cellen (2000nm). Een rendementsverhoging tot 55% mogelijk is door micropiramides toe te passen. Een vierkant of een hexagonaal grondoppervlak geeft voor loodrecht opvallende straling weinig verschil. Met de aanname dat het rendement evenredig is met de stralingsabsorptie van de cel is de rendementverhoging berekend door de absorptie bij nul graden te stellen op een rendement van 100%. Met Micro-V groeven is een rendementverhoging tot 47,6% mogelijk voor loodrecht opvallende straling. Met micropiramides is tot bijna 55% rendementstoename mogelijk. Hoewel de micropiramides een iets hoger rendement geven is het voordeel van de Micro-V structuur dat deze oppervlakken beter schoon blijven door een betere waterafloop. Dit onderzoek heeft aangetoond dat bij de aangroei van PV cellen op een micro-V structuur problemen kunnen optreden door hoge materiaalspanningen, te hoge depositietemperaturen en het te dun worden van de gedoteerde lagen. Door deze problemen is het nog niet mogelijk geweest de voordelen met experimenten aan te tonen.

Voor Lichttransmissie Geoptimaliseerd Afdek materiaal voor Zonnecollectoren en Zonnecellen

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	6
2 Materiaaleigenschappen	7
3 Berekening van Lichttransmissie en Energieopbrengst	9
3.1 Afdekmaterialen voor zonnecollectoren	9
3.2 Microgestructureerde afdekmaterialen	11
3.3 Opbrengst van fotovoltaïsche cellen	14
3.4 Meting van de lichtdoorlatendheid	23
4 Bepaling van de Energie-opbrengsten	25
4.1 Zonnecollectorsystemen	25
4.2 Simulatiemodel en varianten	26
5 Praktijkmetingen	27
5.1 Zonnecollector	27
5.2 Fotovoltaïschesystemen	29
5.3 Kunststof Substraat	31
6 Conclusies en aanbevelingen	36
7 Literatuur	38
8 Publicaties	39
9 Bijlage A Resultaten Collector Inalfa Ares	40

1 Inleiding

De huidige generatie zonnecollectoren en zonnecellen zijn voorzien van vlakke transparante afdekkingsmaterialen. Er zijn verschillende mogelijkheden, namelijk enkel glas, enkellaags kunststof en dubbellaags kunststof (alleen zonnecollectoren). Voor kassen was door Wageningen UR een hoogtransparante afdekking ontwikkeld met een zigzagvorm. Door de zigzag vormgeving wordt een gedeelte van de normaliter door een vlakke plaat gereflecteerde zonnestraling alsnog ingevangen, waardoor de transmissie van de afdekking voor zowel zichtbaar licht als nabij infrarode warmtestraling volgens Raytracing berekeningen 5 - 7% toeneemt. Dit materiaal is als kanaalplaat uitgevoerd en de toepassing als transparant afdek materiaal in zonnecollectoren en fotonvoltaïsche cellen is in dit project onderzocht. De afdekking voor zonnecollectoren kan in een enkellaags en dubbellaags variant uitgevoerd worden. Een rendementsverhoging door de enkellaags variant is mogelijk met dit nieuwe type afdekking omdat dit een hogere lichttransmissie heeft, waardoor over het gehele bruikbare golflengtegebied meer zonlicht doorgelaten wordt. Naast de hogere lichttransmissie zal tevens de materiaalsterkte toenemen. De dubbellaags variant biedt een hogere warmte-isolatie in combinatie met een gelijkblijvende lichtdoorlatendheid. Dit is aangetoond met lichttransmissie metingen voor het golflengte gebied van 400-700nm en voor het gebied 300-2500nm (UV-VIS-IR). De extra isolatie in een dubbellaags uitvoering is voor zonnecollectoren belangrijk omdat daar sprake is van een groot temperatuurverschil tussen de absorber en de buitentemperatuur waardoor het warmteverlies naar de omgeving bij een conventionele enkellaags afdekking groot is. Hoewel verhoging van de warmte-isolatie van transparante materialen bijna altijd gepaard gaat met vermindering van de lichttransmissie kunnen de warmteverliezen naar de buitenlucht afnemen met toepassing van een dubbellaags zigzagvormig materiaal met een vergelijkbare lichttransmissie.

Voor zonnecellen kan er eveneens een energiewinst optreden door de verminderde reflectie aan het oppervlak van de zonnecel. Tevens is van Silicium zonnecellen bekend dat voor met name dunne cellen (amorf en polykristallijn silicium) de absorptiecoëfficiënt in het NIR deel van het spectrum te laag is waardoor in dit gebied niet alle aanwezige energie ingevangen wordt. In dit onderzoek is bekeken of zigzag of Micro-V structuren in combinatie met dunne cellen een groter deel van het spectrum wordt ingevangen door extra meervoudige reflecties. Hierdoor reflecteerd de straling meerdere malen door de cel waardoor er een hogere absorptie zal plaatsvinden. Dit kan resulteren in een cel met de voordelen van gering materiaalverbruik en toch een hoge omzettingsgraad cq. rendement. De berekeningen zijn uitgevoerd met Raytracing gecombineerd met een zonnestraling afhankelijke weging.

2 Materiaaleigenschappen

In Tabel 2-1 is een overzicht weergegeven met de voor zonnecollectorafdekkingen relevante eigenschappen van transparante materialen. Naast een goede transmissie voor zonnestraling in het golflengtegebied van 300-2500 nm is een goede UV- stabiliteit van belang. In verband met de soms hoog oplopende temperaturen tijdens stagnatie in de afname is een hoge maximaal toelaatbare temperatuur eveneens van belang. In Tabel 1 zijn drie transparante materialen groen gemarkeerd vanwege een maximale temperatuur van 180° C of hoger. In het bijzonder bij een dubbele afdekking kunnen dergelijke hoge stagnatietemperaturen optreden waardoor de drie genoemde materialen interessant kunnen zijn als afdekmateriaal van zonnecollectoren. Inmenging van nano(klei) deeltjes kan eveneens de maximale temperatuur alsmede de UV- stabiliteit verhogen. Echter uit informatie van GE-Kunststof te Bergen op Zoom is gebleken dat het innemen van de nanodeeltjes tot op heden nog ten koste gaat van de lichttransmissie.

Tabel 1 Overzicht van voor zonnecollectorafdekking relevante eigenschappen van transparante materialen [1].

Kunststof	Firma	Merknaam	Maximum Temp.	Transmissie [%]	UV- stabiliteit
Polyacrylaat	Röhm	Plexiglas	85 - 115	92	++
Polyamide	Degussa	Trogamid T5000	158	>85	?
	EMS-Chemie	Grilamid Tr55	160	>85	?
	EMS-Chemie	Grilamid Tr90	155	>90	?
Polycarbonaat	Bayer	Macrolon	143 - 148	89	+
	Bayer	Apec	160 - 205	90	+
	GE	Lexaan	~145	~90	+
	DOW	Calibre	~145	~90	+
	Teyin	Panlite	~145	~90	+
	Mitsibithsu	Jupilon	~145	~90	+
	Mitsibithsu	Novarex	~145	~90	+
	SamYang	Trirex	~145	~90	+
	Idemitsu	Taflon	~145	~90	+
	Polycarbonatos do Brasil	Drurolon	~145	~90	+
PET-G	Eastman	Spectar	<100	~90	+
	Zimmer AG	PET	<100	~90	+
Diversen					
Styrol copolymeer	Basf	MABS Terlux	91	88	?
Polypropyleen	Basell	MetocceenPP	145	~85	+
Polyethyleen-propeen-copolymeer (COC)	Ticona Celanese	TOPAS	70 - 180	91	+
Polyethyleen-Acryl-copolymeer	Dupont	Surlyn	80 - 100		+
glas	Glaverbel/ Pilington/etc.	glas	> 400	~ 90	++

Veel van de in Tabel 1 genoemde transparante materialen zijn bruikbaar voor fotonvoltaïsche cellen. Voor zonnecollectoren vallen veel van deze materialen af door te lage maximale temperatuursbestendigheid. De afdekmaterialen die bestand zijn tegen de bij zonnecollector optreden stagnatie temperaturen zijn lichtgroen aangegeven in Tabel 1.

3 Berekening van Lichttransmissie en Energieopbrengst

3.1 Afdekmaterialen voor zonnecollectoren

Het speciaal gestructureerde kunststof materiaal was ontworpen door A&F met een ray tracing computer programma. Dit heeft geresulteerd in de optimale Zigzag geometrie van het materiaal. Als een lichtstraal op een vlak valt geven de wetten van Fresnell aan welk gedeelte hiervan aan de boven- en onderzijde wordt doorgelaten en welk deel wordt gereflecteerd (zie figuur 1, bovenste deel, voor totale doorlaat en reflectie). Het totaal gereflecteerde licht gaat dus verloren. Door het toepassen van een zigzag-vorm voor de doorsnede van een kunststofplaat voor zonnecollectoren en fotovoltaïsche cellen treffen een gedeelte van de gereflecteerde lichtstralen een ander deel van de plaat, zodat deze alsnog gedeeltelijk worden doorgelaten door de plaat (zie figuur 2-1 onderste deel).

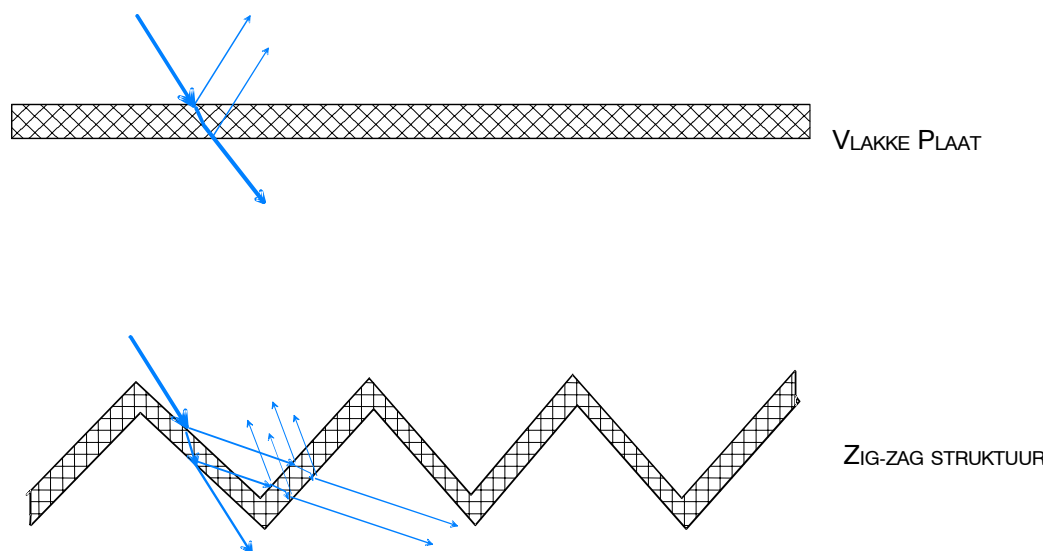


Fig. 1 *Vergelijking van de lichtinval en reflectie van een vlakke plaat en een zigzag-vormige plaat*

Dit is in het bijzonder effectief bij grote invalshoeken. Door dit effect is de transmissie voor diffuus licht van een zigzag-gevormde enkele plaat 6% hogere dan die van een enkele vlakke plaat polycarbonaat. A&F ontwikkelde het idee en de optimale vorm, dikte and afmeting van het zigzag-materiaal. Voor direct opvallend licht is het resultaat van de berekeningen weergegeven in Figuur 2 en voor diffuus opvallend licht in Figuur 3. In beide figuren is de lichttransmissie uitgezet tegen de zigzaghoek (met de horizontaal) voor toenemende absorptie van het materiaal. In Figuur 2 zien we bij toenemende hoeken eerst een kleine afname van de lichttransmissie. Boven de 40° is een sterke toename van de lichttransmissie zichtbaar tot ongeveer 50° . Bij grotere zigzaghoeken ontstaat eerst een afname en daarna weer een toename. Een lokaal maximum ontstaat bij 49° . In Fig. 3 voor diffuus licht is een bijna lineaire toename van de

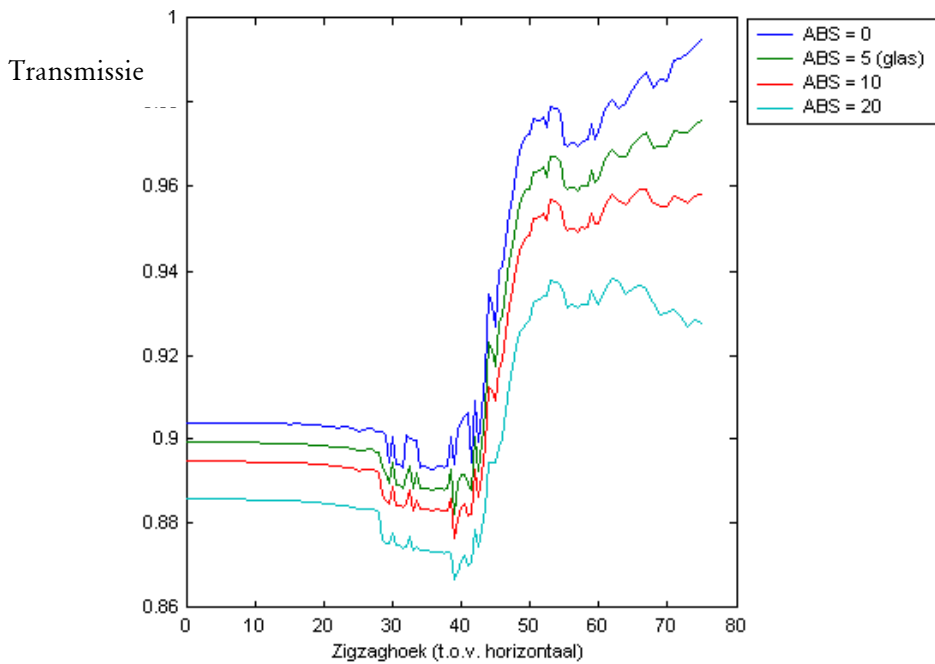


Fig 2. Transmissie voor loodrecht opvallend licht voor een ZigZag-vormige polycarbonaat als functie van de zigzaghoek en absorptiecoëfficiënt. De materiaaldikte is 1mm.

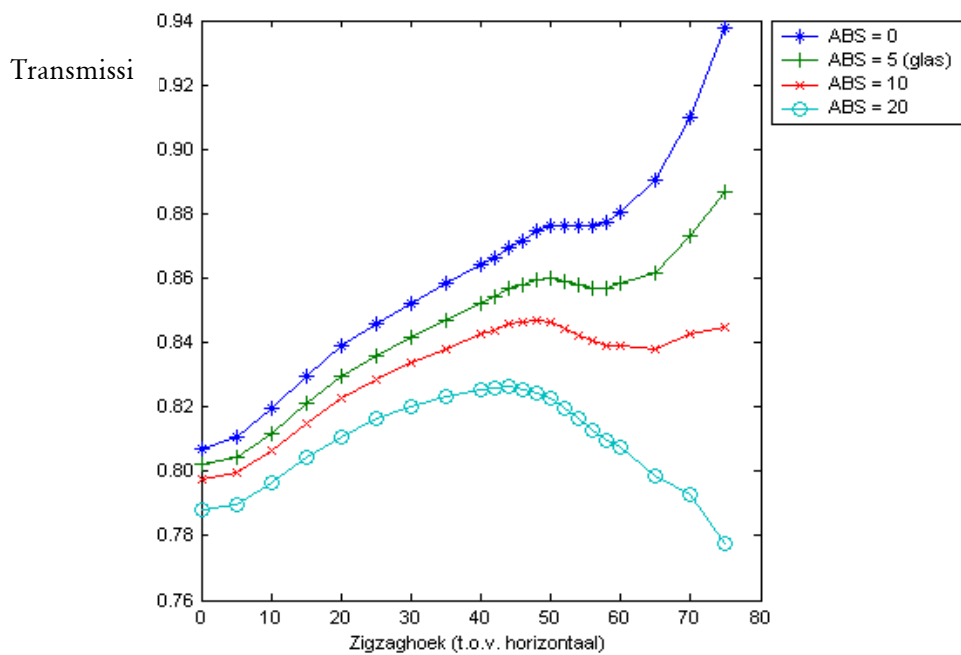


Fig 3. Transmissie voor diffuus opvallend licht van ZigZag-vormige polycarbonaat als functie van de zigzaghoek en absorptie. De materiaaldikte is 1mm.

lichttransmissie te zien bij toenemende zigzaghoek tot een lokaal maximum van ca. 50°. Bij grotere hoeken neemt de lichttransmissie bij lagere absorptie coëfficiënten van het materiaal verder toe.

3.2 Microgestructureerde afdekmaterialen

Het in paragraaf 3.1 genoemde zigzag materiaal is in principe bruikbaar voor zonnecollectoren en fotovoltaïsche cellen. Wat betreft duurzaamheid en temperatuurbestendigheid blijft glas een zeer geschikt materiaal voor zonnecollectoren. Voor fotovoltaïsche cellen wordt zowel glas als PET-G folie gebruikt. Voor beide genoemde materialen geldt dat deze moeilijk in de zigzagvorm zijn te vervaardigen. Tevens is bij fotovoltaïsche cellen de grote materiaalhoogte van 40-70 mm een probleem om gelijkmatig een dunne laag op het oppervlak te laten aangroeien. Daarom is onderzocht of microscopische V-vormen hetzelfde effect op de lichttransmissie kan hebben als het eerdere ontwikkelde zigzag materiaal.

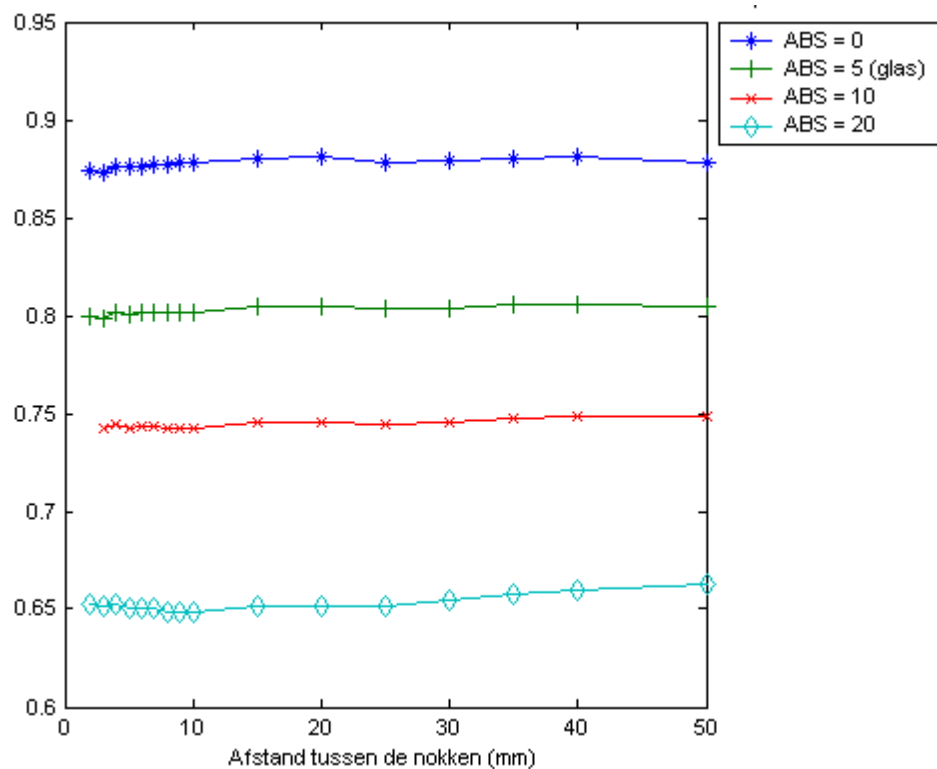


Fig 3. *Transmissie voor diffuus opvallend licht als functie van de nok-nok afstand bij een zigzaghoek van 50°. Het materiaal is 5 mm dik polycarbonaat. ABS=absorptiecoëfficiënt [1/m].*

In Fig. 3 is het resultaat van ray-tracing berekeningen weergegeven waarbij de afstand tussen de nokken gevarieerd is. Bij deze berekeningen is uitgegaan van een zigzaghoek van 50° omdat bij deze hoek de transmissie hoog is (lokaal maximum). Het resultaat van deze berekeningen laat zien dat de nok-nok afstand nauwelijks invloed heeft op het eindresultaat. Dit is bepaald voor verschillende absorptiecoëfficiënten (ABS) van het materiaal. Dit resultaat toont aan dat in plaats van de grotere

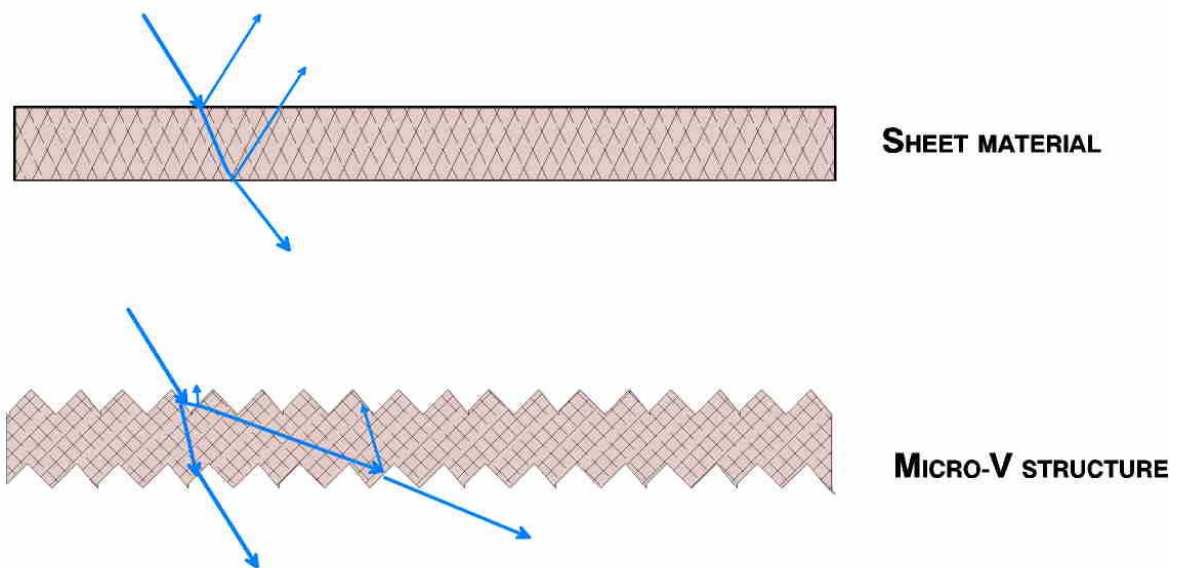


Fig 4. *Vergelijking van de lichtinval en reflectie van een vlakke plaat en een plaat met Micro-V vormige oppervlakte structuur.*

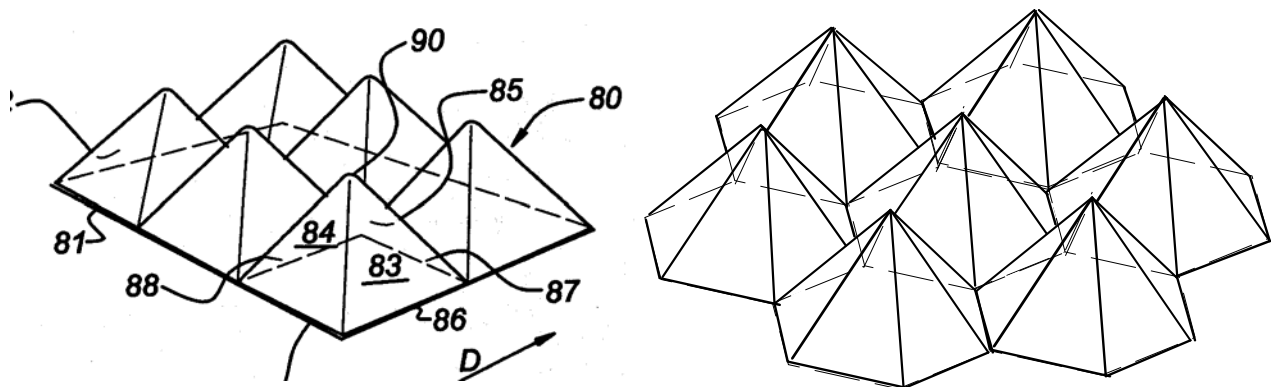


Fig 5. a) *Oppervlaktestructuur met micropiramides met een vierkant grondoppervlak*

b) *Oppervlaktestructuur met micropiramides met een hexagonale grondoppervlak*

zigzag structuren zoals in Fig. 1 zijn aangegeven, eveneens de veel kleinere oppervlakte V-structuren (micro-V groeven) zoals in Fig. 4 aangegeven kunnen resulteren in een verhoging van de lichttransmissie. Van de oppervlakte structuren met micropiramides met een vierkant grondoppervlak in Fig. 5a en van micropiramides een hexagonale grondoppervlak uit Fig. 5b is eveneens het effect op de lichttransmissie bepaald. In Fig. 6 is de transmissie weergegeven van een plaat met een Micro-V oppervlaktestructuur

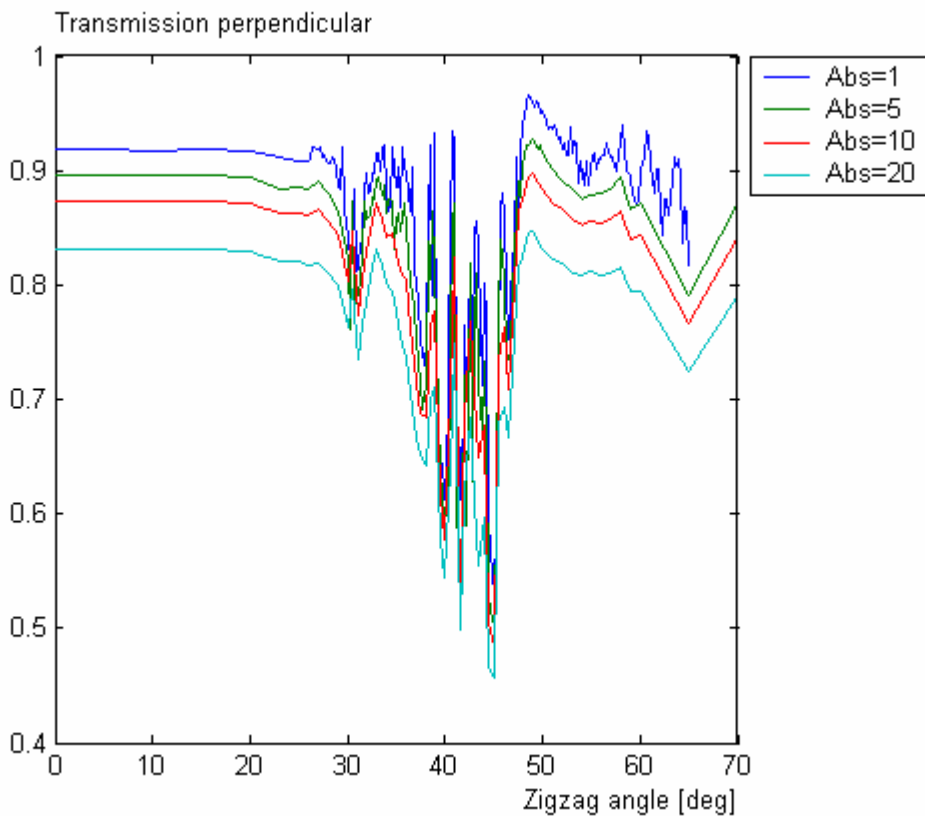
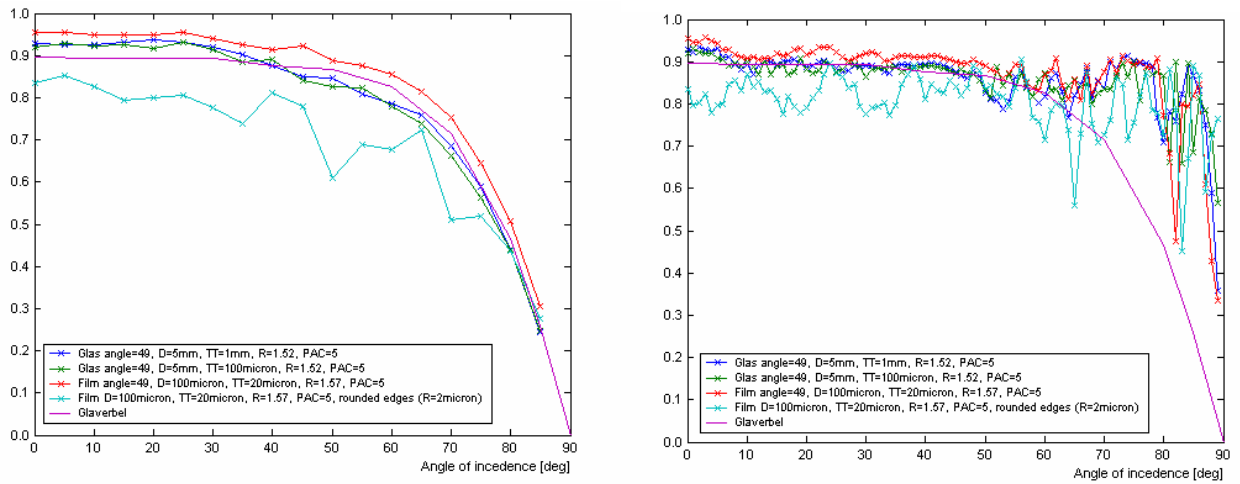


Fig 6. *Transmissie voor loodrecht opvallend licht van polycarbonaat met Micro-V structuur als functie van de zigzaghoek en absorptie*

weergegeven voor verschillende absorptie coëfficiënten (Abs). Bij een hoek van 30° ontstaat een dip in de transmissie. Bij grotere hoeken tot 47° ontstaat een grillig patroon in de transmissie. Rond de 50° is de maximale lichttransmissie bereikt daarna is er weer een geleidelijke afname. Het maximum van de transmissie ligt bij 49° .

De invloed van de invalshoek is voor vier verschillende ontwerpen doorgerekend: twee glas ontwerpen met een top-top afstand van $100\mu\text{m}$ en 1 mm en twee folie ontwerpen met een top-top afstand van $20\mu\text{m}$ en $100\mu\text{m}$ zoals is de figuren is aangegeven. De folie van $100\mu\text{m}$ heeft afgeronde hoeken van $2\mu\text{m}$. Ter vergelijking is tevens de transmissie van standaard glas weergegeven. De invloed van de invalshoek is weergegeven in Fig. 7a en b. In Fig. 7a is de richting van inval parallel aan de oriëntatie van de V-groeven gericht en in Fig. 7b is de richting van inval loodrecht op de oriëntatierichting van de V-groeven. De transmissies met een inval parallel aan de oriëntatie van de V-groeven (Fig. 7a) is bijna gelijk aan de van standaard glas. Alleen bij het monster met de afgeronde hoeken is de transmissie lager. Bij inval loodrecht op de oriëntatierichting (Fig. 7b) is vooral bij grotere invalhoeken de lichttransmissie groter dan die van standaard glas. Van het monster met de afgeronde hoeken is de transmissie weer lager dan die van de overige samples.



a) b)

Fig 7. Transmissie voor direct opvallend licht van glas en polycarbonaat folie met Micro-V structuur als functie van de invalshoek a.) De richting van inval staat parallel aan de oriëntatie van de V-groeven; b.) De richting van inval staat loodrecht op de oriëntatie van de V-groeven,

3.3 Opbrengst van fotovoltaïsche cellen

Het uitgangspunt van de berekeningen is een transparant materiaal met een microstructuur

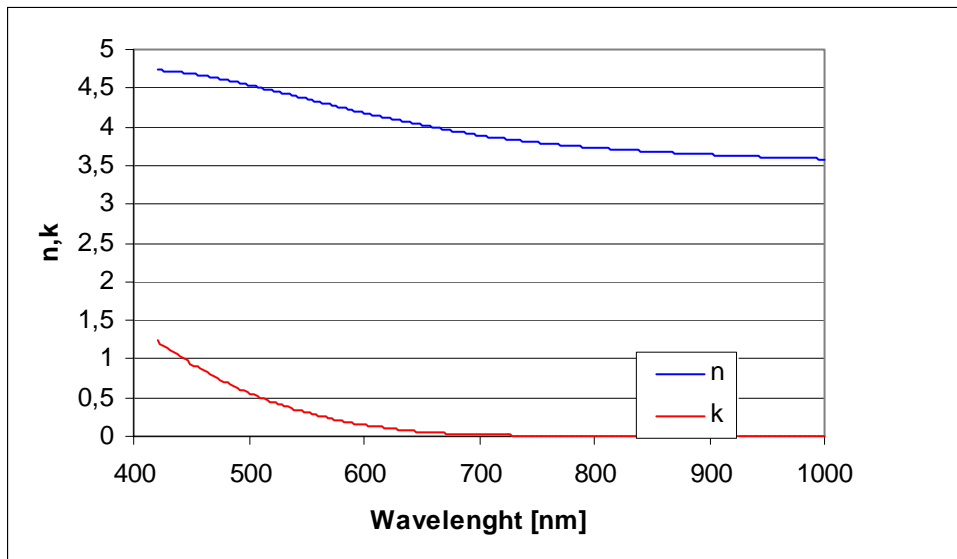


Fig 8. De reële brekingsindex n en extinctiecoëfficiënt k voor amorf Silicium als functie van de golflengte waarop een PV-cel is aangebracht op basis van amorf Silicium met een dikte van 0,5 en 2 μm . Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van een golflengte afhankelijke brekingsindex en extinctie

coëfficiënt zoals weergegeven in Fig. 8. De absorptiecoëfficiënt van het materiaal is dan te bepalen met de vergelijking $\alpha = 4\pi k/\lambda$. In de figuren 9 t/m 13 zijn de resultaten van de Raytrace berekeningen weergegeven als stralingsabsorptie.

In Fig. 9a en b is het resultaat van de Raytrace berekeningen weergegeven als stralingsabsorptie voor Micropiramide oppervlaktestructuren als functie van de hoek (met de horizontale as) van de Micro-V structuur voor direct opvallende straling. Een hoek van nul graden is standaard vlak materiaal. In Fig.9a zijn de resultaten voor a-Si met een materiaaldikte 500nm en in Fig. 9b voor een materiaaldikte van 2 μ m.

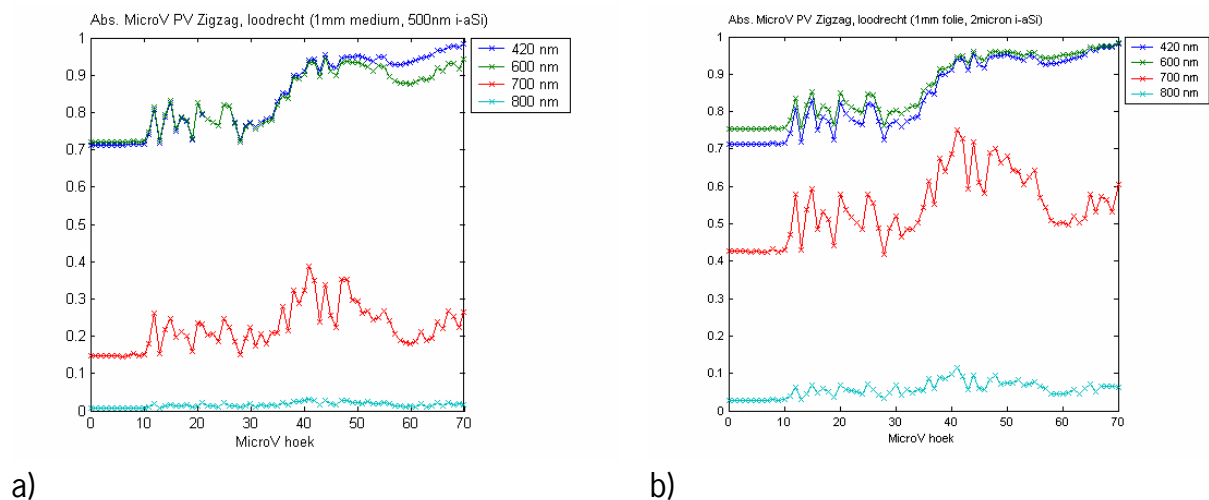
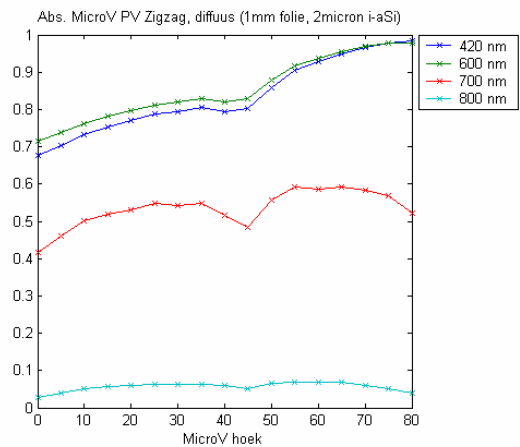
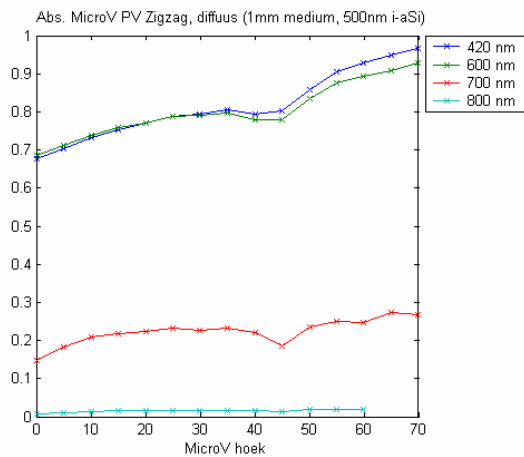


Fig 9. Absorptie van loodrecht licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-V oppervlak als functie van de Micro-V hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

In beide figuren is een verhoogde absorptie zichtbaar bij toenemende hoek van de Micro-V structuur.

In Fig. 10a en b is het resultaat van de Raytrace berekeningen weergegeven van dezelfde Micro-V oppervlaktestructuren als functie van de hoek van de Micro-V structuur waarbij diffuus opvallende straling gebruikt is. In dit geval zien we eveneens een verhoogde absorptie bij toenemende hoek van de Micro-V structuur en het grootste effect wordt eveneens gevonden in het golflengtebereik tussen 400 en 700 nm. In Fig. 10a en b zien we een minder grillig verloop van de absorptie als functie van de Micro-V hoek omdat de invalshoeken bij diffuus licht een groot bereik hebben waardoor verschillen in transmissies en reflecties minder scherp worden. Zowel bij direct- als diffuus licht (Fig.9 en 10) treedt het grootste effect op bij een golflengtebereik tussen 400 en 700 nm. In dit geval is de absorptiecoëfficiënt van a-Si het hoogst.



a)

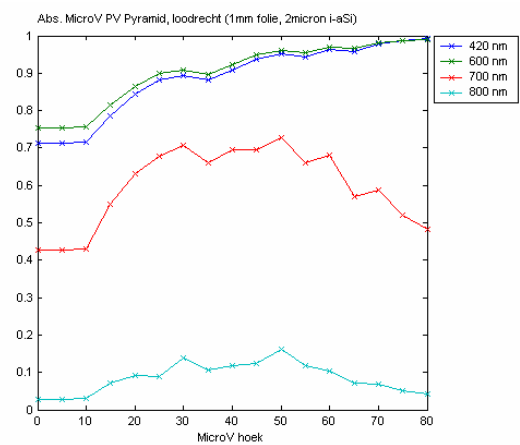
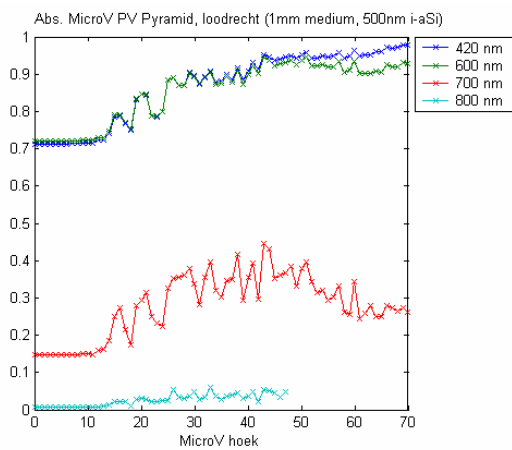
b)

Fig 10. Absorptie van diffuus licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-V oppervlak als functie van de Micro-V hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm.

a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

Voor diffuus licht (Fig.10) treedt er bij 45° een dip op. Juist bij deze hoek kan er blijkbaar totale reflectie optreden waardoor er meer licht uitgekoppeld wordt.

In Fig. 11a en b is het resultaat van de Raytrace berekeningen weergegeven als stralingsabsorptie voor micropiramide oppervlaktestructuren als functie van de hoek.

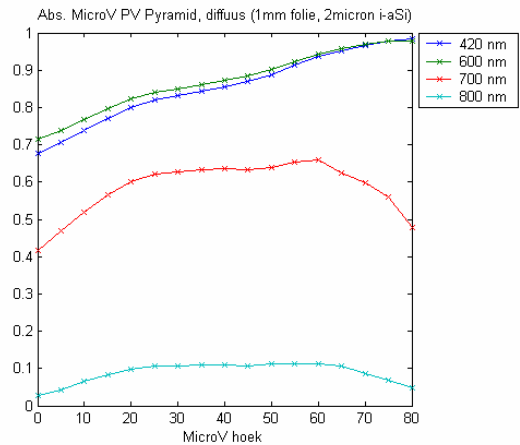
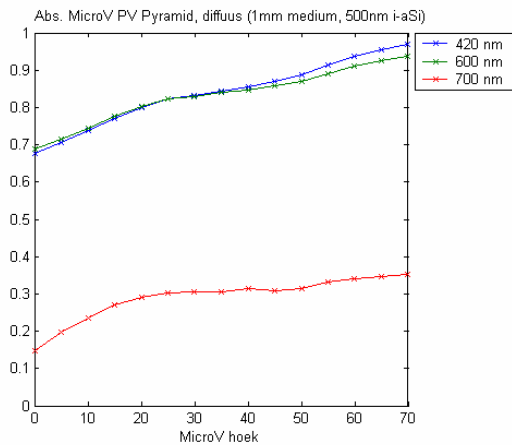


a)

b)

Fig 11. Absorptie van loodrecht licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-piramide oppervlak als functie van de hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte

b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte.

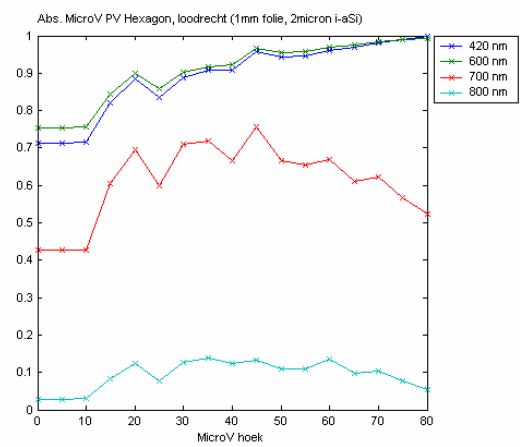
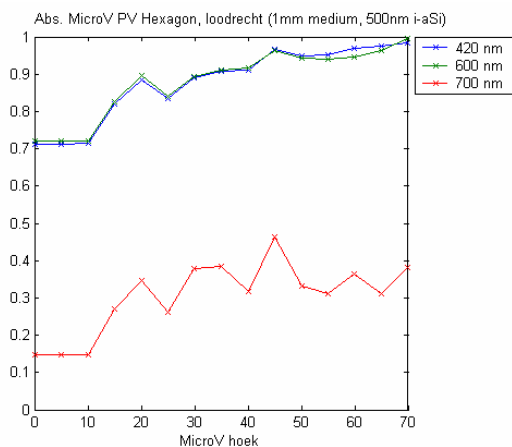


a)

b)

Fig 12. Absorptie van diffuus licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-piramide oppervlak als functie van de hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) i intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

voor direct opvallende straling en in Fig. 12a en b voor diffuus opvallende straling. De tendens is hetzelfde als voor de Micro-V structuur, zonder dat er bij 45° voor diffuus licht een dip in de absorptie ontstaat. Bij grotere hoeken is de absorptie hoger en het effect is het grootst bij de golflengtes tussen 400-700 nm.



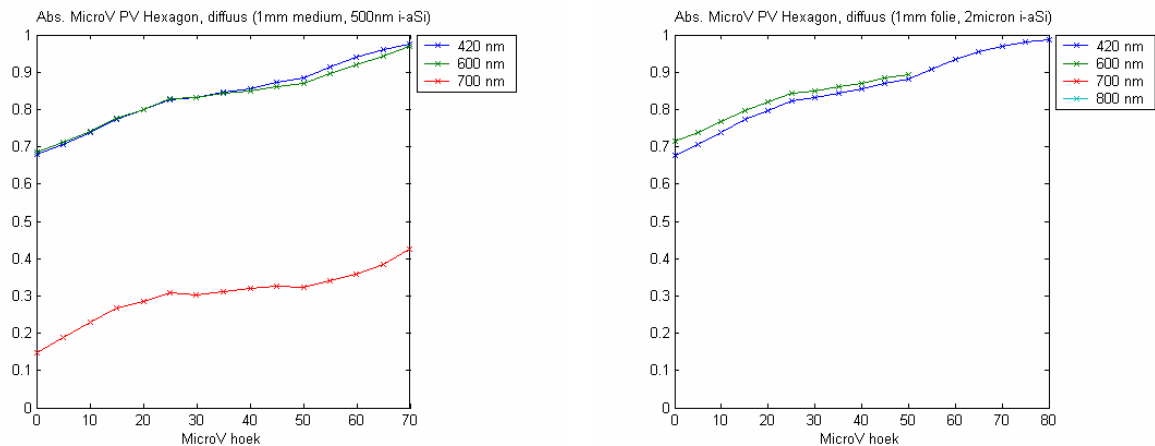
a)

b)

Fig 13. Absorptie van loodrecht opvallend licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-piramides met een hexagonale oppervlak als functie van de hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm. a) i-aSi van 500 nm dikte b) i-aSi van 2000 nm dikte

In de figuren 13a en b is het resultaat van de Raytrace berekeningen weergegeven als stralingsabsorptie voor hexagonale micropiramide oppervlaktestructuren als functie van de hoek van de Micro-V structuur voor oppervlaktestructuren als functie van de hoek voor direct

opvallende straling. Voor diffuus opvallende straling is het resultaat weergegeven in Fig. 14a en b. In vergelijking met de voorgaande resultaten zien we een kleine verhoging van de absorptie coëfficiënt als de hoek van de microstructuur toeneemt. Tevens is er geen dip in de absorptie van diffuus licht bij 45°.



a)

b)

Fig 14. Absorptie van diffuus licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-piramides met een hexagonale oppervlak als functie van de Micro-V hoek bij een golflengte van: 420nm, 500nm, 700nm en 800 nm.

a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

Aan de hand van deze berekeningen en het typische AM 1,5 zonnenspectrum, zoals weergegeven in Fig. 15, is het totale effect van de invloed van de microstructuur berekend.

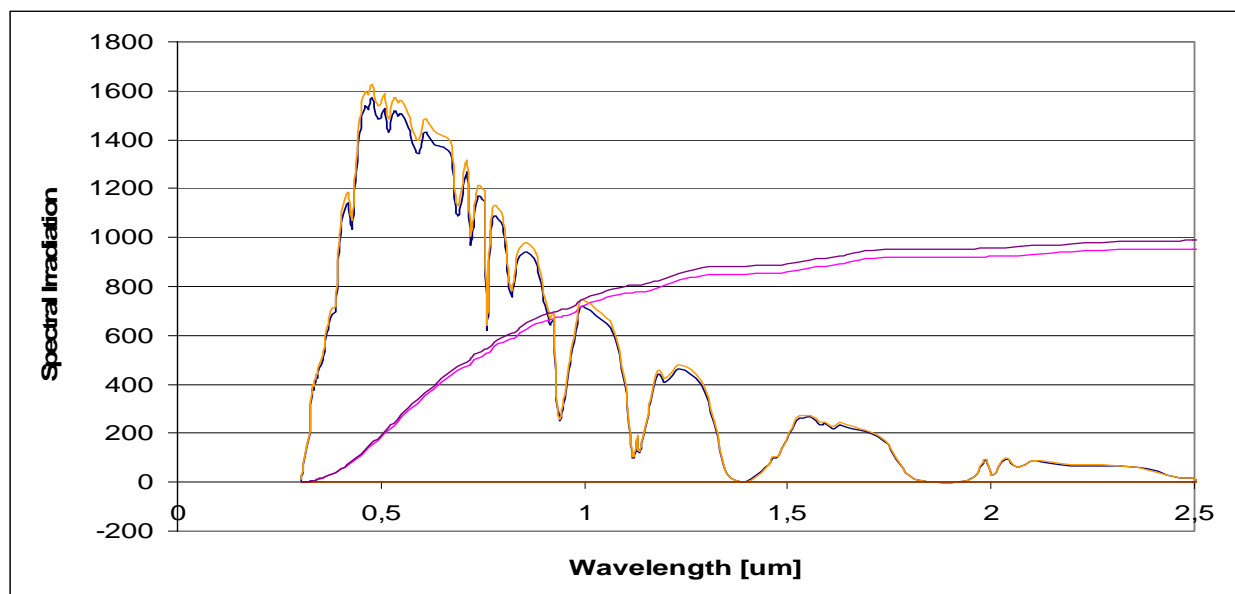
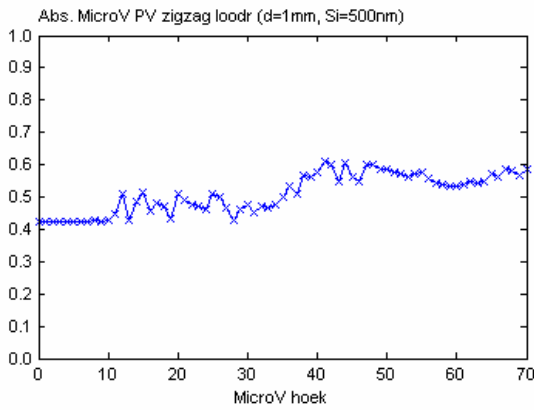
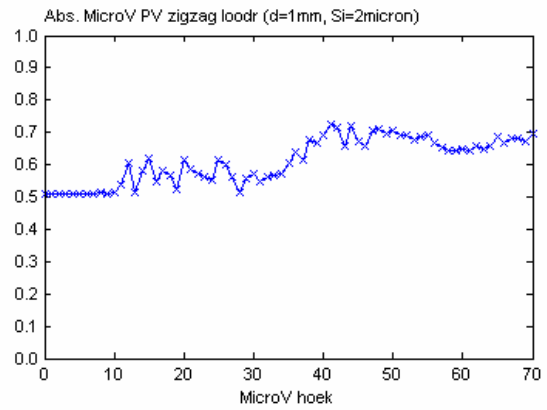


Fig 15. AM1.5 Global Zonnenspectrum vlg. ref. [6]



a)



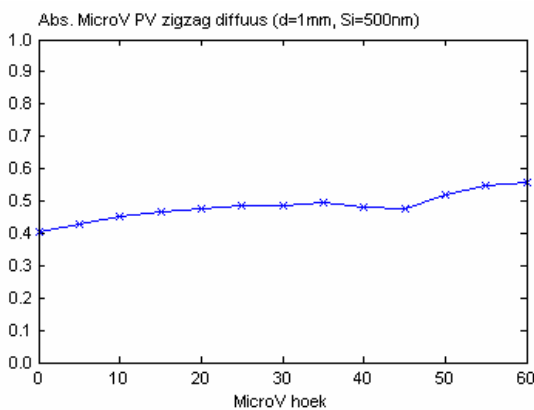
b)

Fig 16. Absorptie van loodrecht licht op fofovoltaïsche structuren op een Micro-V oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig.12. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

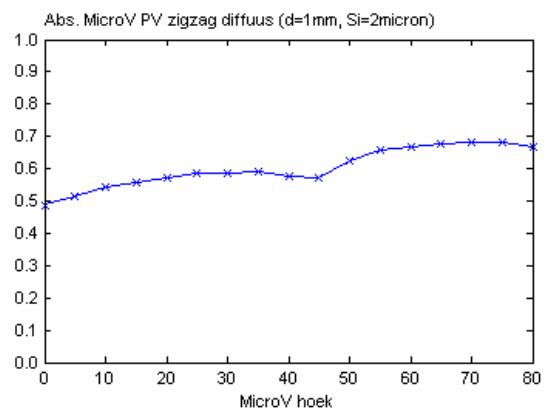
Dit effect is berekend door de golflengte afhankelijke intensiteit van de zonnestraling mee te

wegen volgens:
$$A = \frac{\sum_{\lambda=400}^{800} A(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot d\lambda}{\sum_{\lambda=400}^{800} I(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

Met $A(\lambda)$ de golflengte afhankelijke absorptiecoëfficiënt en $I(\lambda)$ de golflengte afhankelijke intensiteit. Omdat het silicium alleen in het golflengtegebied van 400-800nm een redelijke

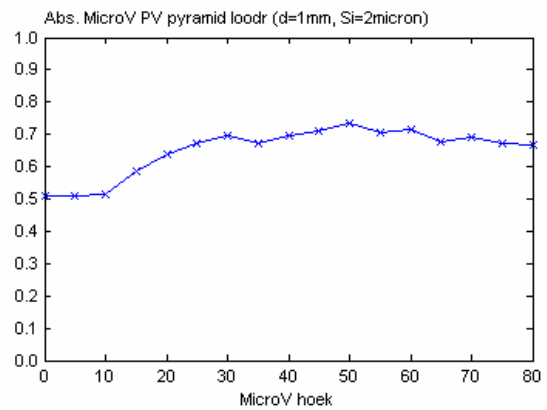
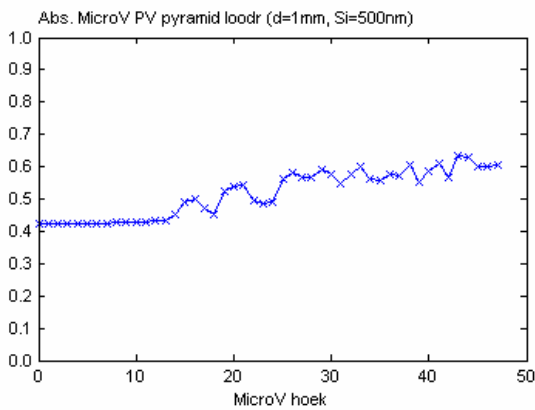


a)



b)

Fig 17. Absorptie van diffuuslicht op fofovoltaïsche structuren op een Micro-V oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig.12. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

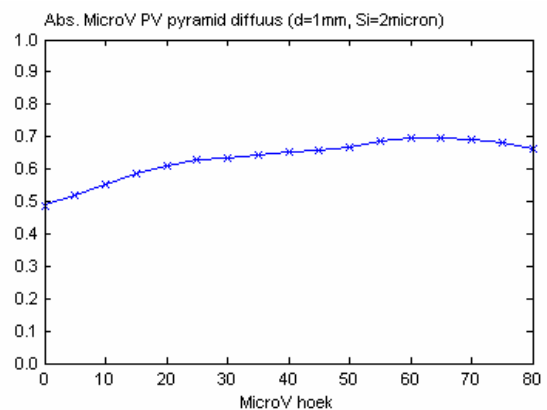
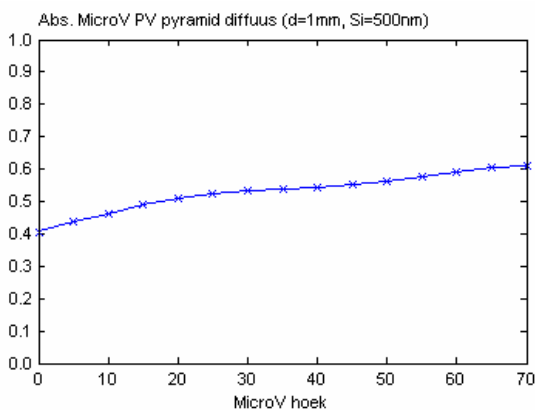


a)

b)

Fig 18. Absorptie van loodrecht licht op fofovoltaïsche structuren op een Micro-V piramide oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig.12. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

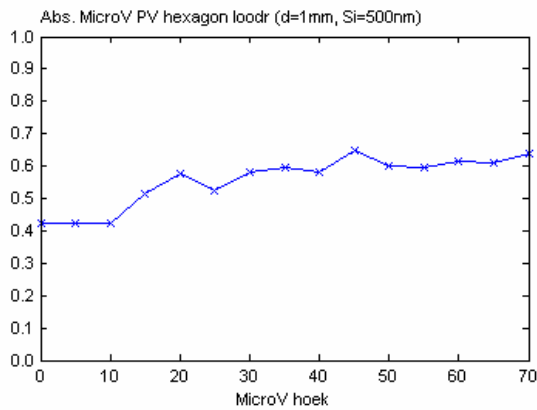
absorptie heeft, is alleen voor dit golflengtegebied het totale effect op de absorptie met vergelijking (1) berekend, met de data zoals weergegeven in de figuren 9 t/m 14. De resultaten van de berekeningen zijn grafisch weergegeven in de figuren 16 t/m 21. In Fig. 16 is de gewogen absorptie weergegeven voor het Micro-V materiaal met direct opvallend licht. Fig. 16a geeft het resultaat voor een laagdikte van 500 nm en Fig. 16b voor een laagdikte van 2µm. In Fig. 17 zijn deze resultaten voor dezelfde structuur weergegeven met diffuus opvallend licht. Het resultaat hiervan is minder grillig dan in het geval van direct opvallend licht omdat bij diffuus licht een groot aantal invalshoeken geïntegreerd worden zodat hoekafhankelijke effecten worden uitgemiddeld.



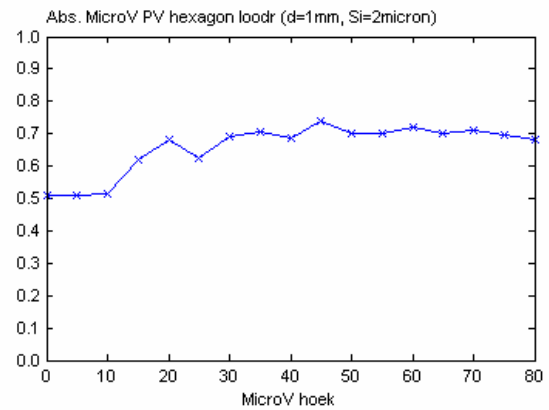
a)

b)

Fig 19. Absorptie van diffuuslicht op fofovoltaïsche structuren op een Micro-V piramide oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig.12. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte



a)

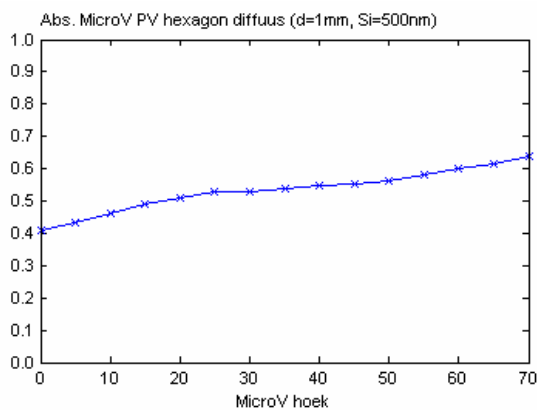


b)

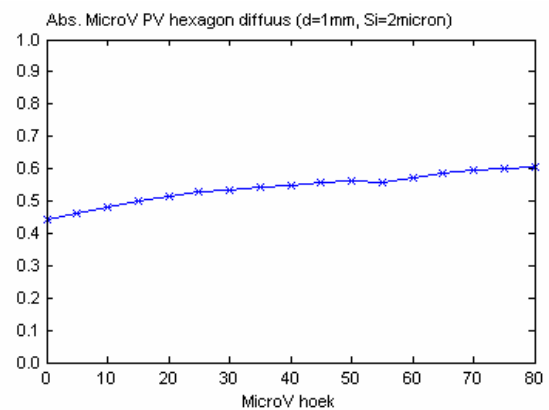
Fig 20. Absorptie van loodrecht licht op fotonvoltaïsche structuren op een Micro-V hexagonaal piramide oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig. 12.

a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

In Fig. 18 en 19 is de gewogen absorptie weergegeven voor het materiaal met micropiramide oppervlaktestructuren voor respectievelijk direct en diffuus opvallend licht. De figuren 18a en 19a geven de resultaten voor een laagdikte van 500 nm en de figuren 18b en 19b voor een laagdikte van 2µm. Het resultaat bij diffuus licht is minder grillig dan in het geval van direct opvallend licht omdat bij diffuus licht een groot aantal invalshoeken geïntegreerd worden zodat hoekafhankelijke effecten uitgemiddeld worden. In vergelijking met de Micro-V structuur is er geen dip in de absorptie van diffuus licht bij 45°.



a)



b)

Fig 21. Absorptie van diffuus licht op fotovoltaïsche structuren op een Micro-V hexagonaal piramide oppervlak als functie van de Micro-V gewogen met het AM1,5 zonnenspectrum zoals weergegeven in Fig. 12. a) intrinsiek a-Si van 500 nm dikte b) intrinsiek a-Si van 2000 nm dikte

In Fig. 20 en 21 is de gewogen absorptie weergegeven voor het materiaal met hexagonale micropiramide oppervlaktestructuren voor respectievelijk direct en diffuus opvallend licht. De figuren 20a en 21a geven de resultaten voor een laagdikte van 500 nm en de figuren 20b en 21b voor een laagdikte van 2µm. Het resultaat bij diffuus licht is weer minder grillig dan in het geval van direct opvallend licht omdat bij diffuus licht immers een groot aantal invalshoeken geïntegreerd worden zodat hoekafhankelijke effecten uitgemiddeld worden. Het resultaat is bijna gelijk als de resultaten van de (vierkante) micropiramide oppervlaktestructuren (Fig. 18 en 19). In vergelijking met de Micro-V structuur is er geen dip in de absorptie van diffuus licht bij 45°.

Een overzicht van de resultaten van de Raytrace berekeningen is weergegeven in Tabel 4. De extra absorptie is bepaald uit het verschil tussen de absorptie bij nul graden en de maximale absorptie uit de figuren 16 t/m 21. Tevens is de optimale hoek met de horizontaal aangegeven. Voor loodrecht opvallende straling ligt de optimale hoek tussen de 40° en 50°. Bij diffuus opvallende straling is de optimale hoek groter en ligt tussen de 60° en 80°.

Tabel 4. Overzicht Raytracing berekeningen: extra absorptie, optimale hoek en rendementverhoging voor fotovoltaïsche cellen

Systeem	Belichting ²	Extra absorptie ¹		Hoek bij max. abs. [°]		Extra rendement [%]	
		500 nm	2000 nm	500 nm	2000 nm	500 nm	2000 nm
Celdikte:							
Micro-V groeven	L	20	21	42/48	42/44	47,6	42
	D	□16	18	□ 60	65-75	□40	36
Micropiramides met vierkant grondoppervlak	L	23	22	43-45	50	54,8	44
	D	20	19	□ 70	60-65	47,6	38
Micropiramides met hexagonaal grondoppervlak	L	23	23	45/70	45	54,7	46
	D	22	16	□ 70	80	53,7	35

¹)Voor het gehele zonnenspectrum

²)L=loodrecht opvallend; D=diffuus opvallende straling

Bij dunnere cellen(500nm) is de rendementverbetering hogere dan bij de dikkere cellen (2000nm). Uit de tabel blijkt dat voor direct opvallende licht een rendementsverhoging met 55% mogelijk is door micropiramides toe te passen. Een vierkant of een hexagonaal grondoppervlak geeft voor loodrecht opvallende straling weinig verschil. Met de aanname dat het rendement evenredig is met de stralingsabsorptie van de cel is de rendementverhoging

berekenend door de absorptie bij nul graden te stellen op een rendement van 100%. Voor diffuus opvallende licht is de micropiramide met hexagonaal grondoppervlak het optimaal. Met Micro-V groeven is een rendementverhoging met 47,6% mogelijk voor loodrecht opvallende straling. Met micropiramides is tot bijna 55% rendementstoename mogelijk. Hoewel de micropiramide een iets hoger rendement geeft, is het voordeel van de Micro-V structuur dat deze oppervlakken beter schoon blijven door een betere waterafvoer.

3.4 Meting van de lichtdoorlatendheid

De lichtmetingen van het Zigzagmateriaal zijn uitgevoerd op een Integrerende Ulbricht-kogel zoals die bij A&F operationeel is. Dit materiaal is gebruikt voor de zonnecollector die vervaardigd is en waaraan praktijkmetingen zijn verricht (zie hoofdstuk 5).

Op deze kogel zijn voor monsters van 50x50 cm de reflectie diffuus van de onderkant (Rd2), de transmissie diffuus van de bovenkant (Td1) en de transmissie loodrecht van de bovenkant (Tkl1) gemeten voor het gebied van 400-700nm (zichtbare licht, ook wel PAR (Photosynthetic Active Radiation) genoemd). Binnen dit golflengtegebied is om de 10nm een meting uitgevoerd. Deze metingen worden daarna nog negen keer herhaald zodat de uiteindelijke resultaten gebaseerd zijn op een serie van 10 metingen. De reflectie wordt gemeten doordat in de kogel een drietal lampen zorgt voor diffuus licht in de bol dat op de onderkant van het monster valt. Bij de meting voor de diffuse transmissie worden lampen rondom de kogel aangeschakeld, waardoor er op een kunstmatige hemel die boven de kogel is gesitueerd een diffuse lichtstroom wordt gegenereerd. Op de bovenkant van het monster valt dan alleen maar diffuus licht. Tenslotte kan door het aanschakelen van lampen die hoog in de hemel zijn aangebracht een loodrechte lichtstroom op het monster worden gericht. Voor de Nederlandse klimaat omstandigheden is de diffuse straling het belangrijkste. Vooral in winterse omstandigheden bestaat circa 75 % van de stralingssom uit diffuus licht.

Met behulp van een Integrerende Ulbricht-kogel van GE-Kunststof (vervaardigd door A&F) is ook de lichtdoorlatendheid gemeten voor het gebied 300-2500nm (UV-VIS-IR). Deze metingen betreffen de loodrechte transmissie voor een deel van het UV-gebied (300-380nm), het gehele Visuele gebied (380-780nm) en een deel van het infrarode gebied (380-2500nm).

Bij deze meetwaarden is met een Europese norm EN-420 de gemiddelde transmissie bepaald voor het zonnenspectrum.

Tabel 2 *Overzicht van de meetresultaten gewogen volgens EN 420 en NEN 2675*

Materiaal	Standaard	Transmissie (%)		Reflectie	
		direct	diffuus	direct	diffuus
Lexan ZigZag	a. PAR vlg. NEN 2675	90,9	80,3	0,05	0,113
	b. Solar vlg. EN 420	84,4	74,6	-	-
Floatglas	a. PAR vlg. NEN 2675	90,2	83,0	0,05	0,09
	b. Solar vlg. EN 420	85,2	78,4	-	-

Meetresultaten

De lichttransmissie als functie van de golflengte van het licht is gemeten voor loodrecht opvallend en diffuus opvallend licht. In Fig. 22 zijn deze resultaten, gemeten op de Ulbrichtkogel van A&F weergegeven als functie van de golflengte voor het gebied 400-700nm voor Lexan ZigZag plaat. Uit deze grafiek blijkt dat in het golflengtegebied 400 nm en kleiner de transmissie afneemt door de aanwezige UV coating. Door het relatief vlakke spectrum in het PAR-gebied (400-700nm) verandert de lichtkleur nauwelijks. In Tabel 2 zijn de meetresultaten voor floatglas en Lexan ZigZag plaat samengevat. Het gemeten lichtspectrum is gewogen naar NEN-2675 en EN-420 levert de meetwaarden weergegeven in de kolommen 3 t/m 6.

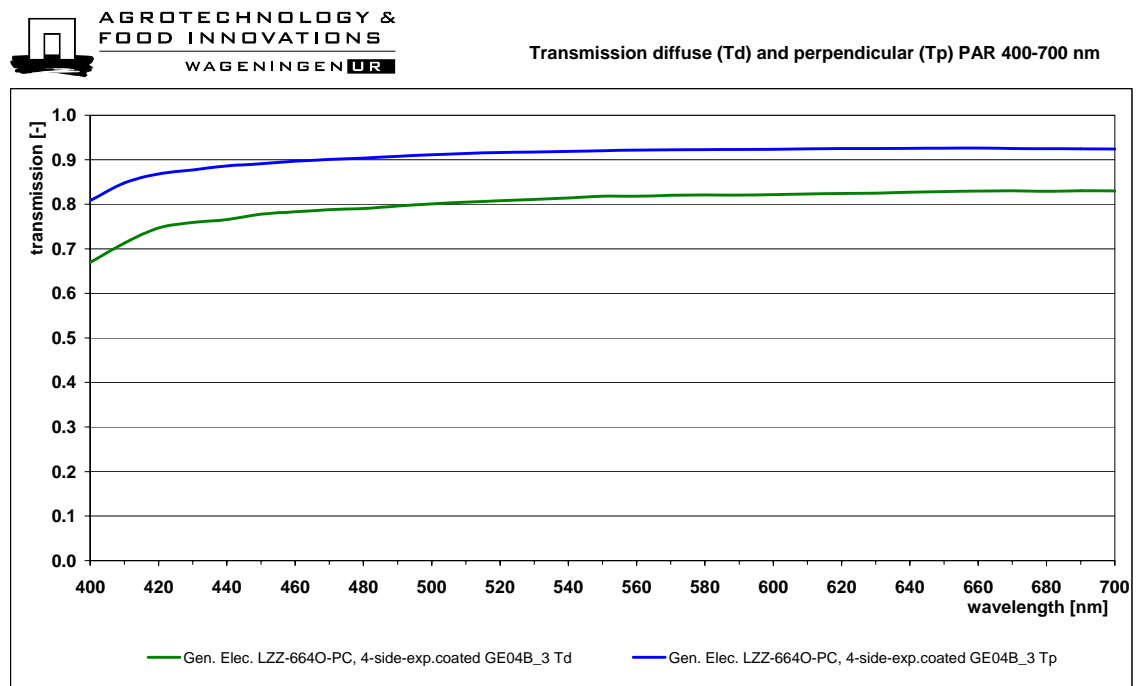


Fig 22. Lichttransmissie van de Lexan ZigZag plaat voor Loodrecht- en diffuus opvallend licht als functie van de golflengte

4 Bepaling van de Energie-opbrengsten

4.1 Zonnecollectorsystemen

Het collectorrendement is allereerst bepaald afhankelijk van het product van de (invalshoekafhankelijke) transmissie van de collector afdekking en de (invalshoekafhankelijke) absorptiecoëfficiënt $\eta_0[\tau(\varphi, \theta), a(\varphi, \theta)]$ van de absorber. Dit rendement vermindert door de warmteverliezen die afhankelijk zijn van de warmtedoorgangscoefficiënt C_1 . Voor een enkellaags afdekking is deze waarde $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ en voor een dubbellaagsafdekking bij benadering $3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Het collector rendement is dan te bepalen met:

$$\eta = \eta_0[\tau(\varphi, \theta), a(\varphi, \theta)] - C_1 \cdot T^* - \frac{C_2 \cdot T^{*2}}{G} \quad (2)$$

waarbij T^* een stralingsgenormeed temperatuursverschil is volgens

$$T^* = \frac{T - T_0}{G} \text{ met } G \text{ de globale straling (in Nederland maximaal } 800 \text{ W/m}^2\text{)}. \text{ Met de in Tabel 2}$$

aangegeven waarden voor de lichttransmissie van een enkele en dubbele afdekkingslaag en een absorptie coëfficiënt van 0,96 voor de collector is het rendement van de collector te berekenen. Het resultaat is weergegeven in Fig. 23a en 23b voor respectievelijk loodrecht invallende straling en diffuse straling.

Voor enkel Micro-V afdek materiaal ontstaat 4-5 % rendementsverhoging (absoluut) t.o.v. enkelglas. Bij een dubbeldek ontstaat een rendementsverhoging van 8-10 %. Het resultaat is dan dat zowel bij grotere als bij kleinere temperatuursverschillen met dubbel Micro-V afdekking een meeropbrengst ontstaat. Bij grotere temperatuursverschillen neemt het rendement en dus de opbrengst toe tot ca. het dubbele van enkel glasafdekking.

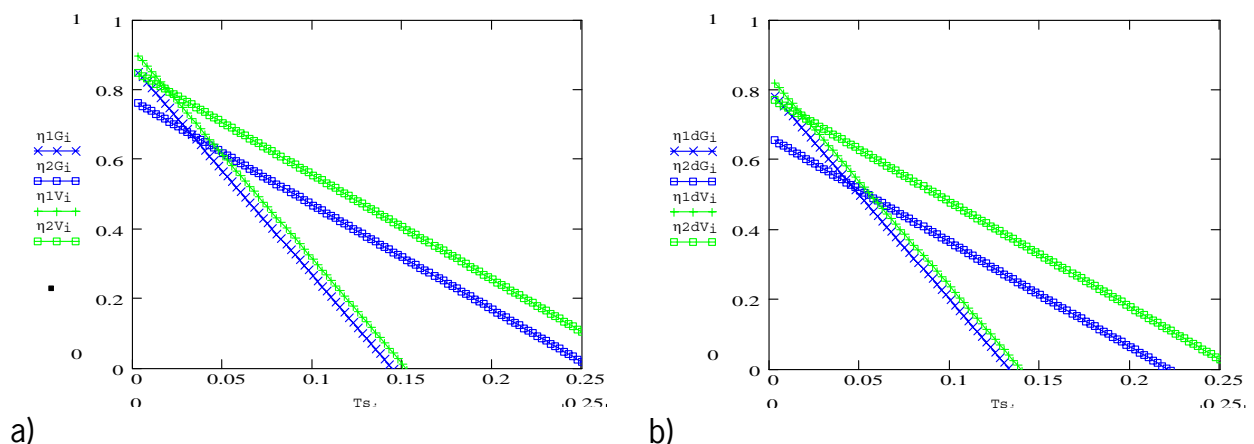


Fig. 23 Het rendement van een zonnecollector voor de voor straling gecorrigeerde temperatuur (T_s) voor verschillende afdekkingmaterialen, \times enkellaags glas, \square dubbellaags glas, $+$ enkellaags Micro-V en \square dubbellaags Micro-V. **a)** Voor loodrecht opvallende straling en **b)** Voor diffuus opvallende straling.

4.2 Simulatiemodel en varianten

Met Nederlandse klimaat data (Referentie jaar van KNMI weerstation De Bilt, Nederland) is de jaarlijkse opbrengst berekend met het simulatieprogramma voor zonnecollectors: VABI voor een ZEN Solar systeem met collector oppervlak van 2,75 m² en een boiler inhoud van 90 dm³. De tapwater vraag is 110 dm³ per dag en de temperatuur van het ingaande water is 15 °C en een eind temperatuur van 65 °C. Dit komt overeen met een energiehoeveelheid van 8.391 MJ per jaar. Het optisch rendement van de absorber is 0,867. In Tabel 3 is de opbrengst van het systeem met verschillende transparante materialen weergegeven. Verandering van enkel glas naar Micro-V glas resulteert in 4 % extra opbrengst. Een extra opbrengst van 9 % is mogelijk met een dubbel Micro-V afdekkingsmateriaal.

Tabel 3 *Opbrengst van een zonnecollector in Nederland met verschillende transparante materialen*

	Transparant materiaal			
	Enkel glas	Enkel glas met Micro-V	Dubbel glas	Dubbel glas met Micro-V
Transmissie	0,905	0,955	0,824	0,90
Optisch rendement	0,784	0,828	0,714	0,780
Thermische verlies factor	3,5	3,5	2,3	2,3
Opbrengst per jaar [MJ]	3.820	3.975	3.917	4.164
Opbrengst vergeleken met referentie systeem [%]	100,0	104,0	102,5	109,0

5 Praktijkmetingen

5.1 Zonnecollector

ZEN Solar heeft twee zonnecollectoren vervaardigd, één met standaardglas als afdek materiaal en één met zigzag afdek materiaal. In Figuur 25 zijn de twee zonnecollectoren weergegeven. De afmetingen van de collectoren zijn 125 x 79 cm. Van beide collectoren is de stagnatie temperatuur gemeten met één thermokoppel in het centrum en één 18 cm van de rand. De collectoren zijn belicht met de belichtingsstand zoals weergegeven in Fig. 26. Met deze stand is tot een vermogen van ca. 520 W/m² belichting mogelijk onder verschillende hoeken.

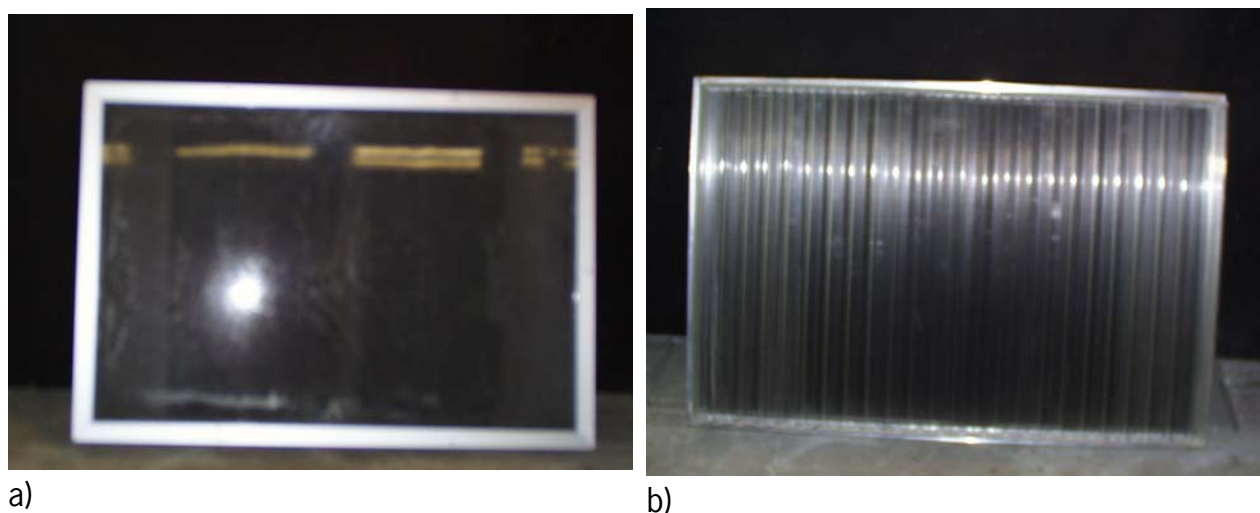


Fig 25. a) Zonnecollector met standaard glas afdekking b) Zonnecollector met Lexan ZigZag afdekking

Het belichtingsvermogen is in 9 stappen regelbaar. Met een data logger zijn de stagnatietemperaturen, de ingestraalde vermogensdichtheid (met een Kipp solarimeter) en de inclinatie van de lichtbron gemeten. Uit drie metingen met verschillende belichtingssterktes is met vergelijking (2) op pagina 27 de constanten, C_1 en C_2 te berekenen door het rendement op nul te stellen. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4. Uit deze tabel blijkt dat het rendement van de collector met het zigzag-materiaal vergelijkbaar met dat van enkelglas.

Tabel 4 Samenvatting meetresultaten van de twee zonnecollectors met verschillende transparante materialen

	Collectortype/meetplaats			
	Enkel glas centrum	Enkel glas met rand	ZigZag centrum	ZigZag rand
Optisch rendement [%]	83	82	86	84
Parameter C1 (U-waarde) [W/m ² K]	4,5	4,7	4,3	4,5
Parameter C2 [W ³ /m ⁴ K ²]	-550	-620	-540	-400



Fig 26. Testopstelling met hoekafhankelijke halogeenverlichting van 13,5 KW.
(Voormalige IMAG locatie Mansholtlaan 10-12)

Verder blijkt dat de isolatiewaarde C_1 bij de zigzag-collector nauwelijks hoger is dan die van enkel glas. Dit kan verklaard worden door de in het algemeen hoge temperatuursverschillen die bij zonnecollectoren optreden. De voor kassen ontwikkelde zigzagplaat heeft vrij grote luchtkamers, waardoor bij grotere temperatuursverschillen de lucht in de kamers door convectie kan gaan stromen waardoor de isolatiewaarde lager wordt. Voor $L = 10$ mm, Grashof (kengetal voor stroming door vrije convectie) en is circa $100 \times \Delta T$. Bij $Gr > 1500$ convectiestroming, dus bij $\Delta T > \text{circa } 15$ K inderdaad convectiestroming te verwachten, waarneming van slechte isolatie klopt dus. Daarom is deze plaat minder geschikt voor zonnecollector toepassingen.

De metingen zijn tevens hoekafhankelijk uitgevoerd met lichtinval parallel en dwars op de zigzag richting. De resultaten zijn in Fig. 27 weergegeven. Hier is het voor straling gecorrigeerde temperatuursverschil uitgezet tegen de hoek van inval (loodrecht is 0 graden). In het gebied van 20-60 graden blijkt de zonnecollector met zigzag afdek materiaal een hogere T_s (voor straling gecorrigeerde temperatuur) te bereiken door hogere lichttransmissie van het materiaal. Bij grotere hoeken ontstaat een lagere T_s wanneer het zigzagstructuur parallel loopt met de hoek

van inval. Bij glas ontstaan eveneens verschillen die waarschijnlijk ontstaan door minder homogene belichting. Als de zigzagstructuur dwars op de invalrichting staat ontstaat bij de grotere hoeken eveneens een hoger rendement dus hogere T_s .

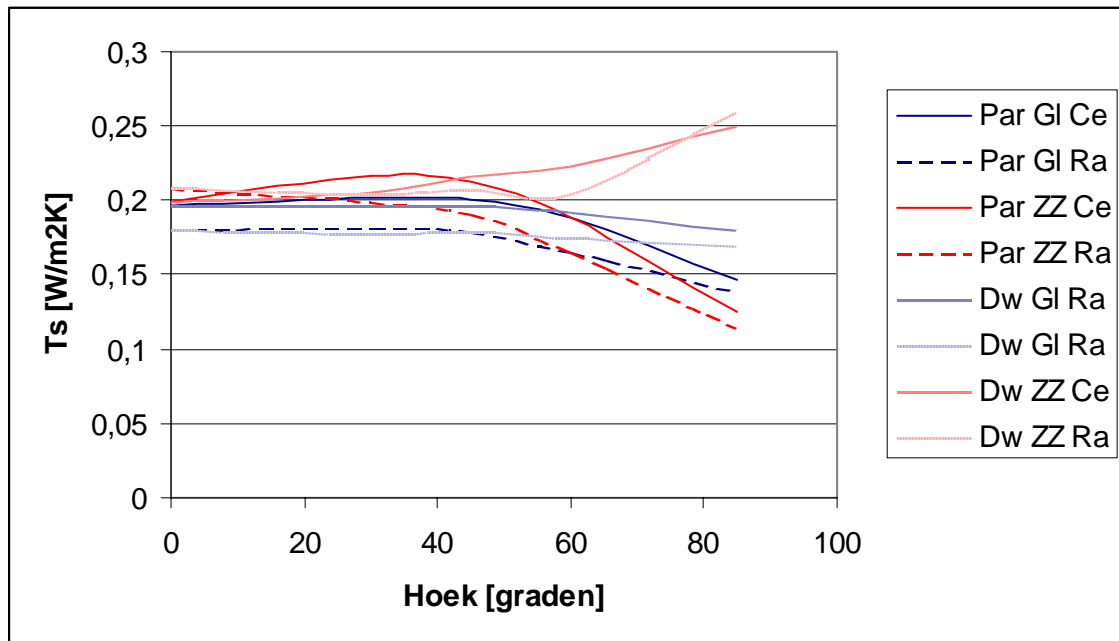


Fig 27. Voor straling gecorrigeerd temperatuursverschil als functie van de invalshoek
Afkortingen: Par/Dw: parallel/dwars aan de ZigZagrichting.
GI/ZZ: Glas/ZigZag afdekingsmateriaal
Ce/Ra: Temperatuursmeting centraal/rand

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat het van belang is de collector met het zigzagmateriaal in de juiste positie te plaatsen. Wanneer de collector met de zigzagstructuur op het zuiden gericht is en de zigzagstructuur verticaal gericht is dan wordt er optimaal gebruik gemaakt van de eigenschappen van het zigzagmateriaal en wordt de momentane opbrengst hoger. Met name s'morgens en s'avonds bij grotere invalshoeken ontstaat tot 25% hogere opbrengst. Bij de optimale plaatsingshoek van 30- 45° is de afwijking in de elevatierichting nooit groter dan 30° waardoor er geen opbrengstvermindering ontstaat.

5.2 Fotovoltaïschesystemen

Het doel van dit project is om dunne film zonnecellen op substraten met een micro-V structuur te vervaardigen omdat een verhoogde lichttransmissie door de zigzag substraten kan behaald worden. We hebben de cellen op glas en kunststof substraten laten aangroeien. Terwijl de glassubstraten met een zigzag oppervlak heel dik (enkele mm) zijn, zijn de kunststof substraten wat dunner (enkele microns) In de volgende paragraaf zijn de resultaten van de zonnecellen op de twee substraten beschreven.



Fig. 28a: Afmetingen van het glas substraat met een zigzag vorm aan de bovenzijde

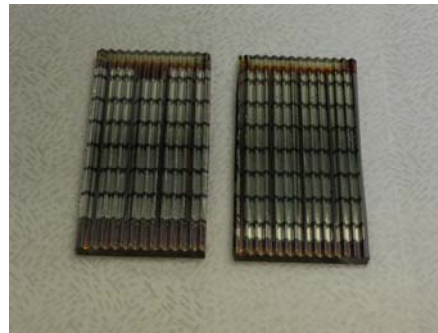


Fig. 28b Foto van de complete p-i-n zonnecel op het zigzag glas

Glas substraat :

In Fig 28a wordt de structuur van een typisch glassubstraat met zigzag oppervlak weergegeven. De structuur is vlak op een zijde en V-type aan de andere zijde. De totale dikte van het substraat is 6mm en het bevat een zigzag structuur met een piek-tot-piek afstand van 1,5micrometer. Omdat het glas een hoge temperatuur kan weerstaan, maakten we pin type amorfe silicium zonnecellen met standaard depositie condities (200 graden). Figuur 28b toont de foto van een zonnecel. Het siliciummateriaal is vervaardigd met zeer hoog frequent plasma

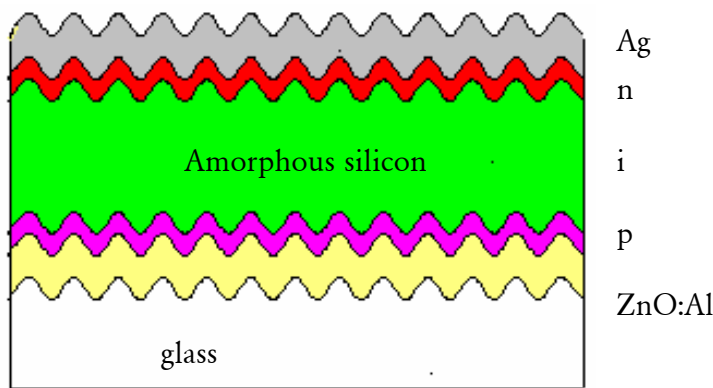


Fig. 29 Schema van de structuur (dwarsdoorsnede) van de zonnecel

geïnduceerde chemische damp depositie (VHFPECVD) en aangebracht op de transparante glas substraten die met aluminium gedoteerde zinkoxide (ZnO:Al) bedekt zijn. De ZnO:Al laag is eigenlijk een contact materiaal en wordt ook de transmissie begeleidendes laag (TCO) genoemd. De TCO is op de zigzag zijde van het glas door RF magnetron sputtering gedeponeerd. De cel structuur is als volgt: Glas/ZnO:Al/p-a-SiC:H/i-a-Si:H/n-a-Si:H/Ag zoals aangegeven in figuur 29.

Figuur 30 laat de I-V karakteristiek van een p-i-n cel op zigzag glas zien. Deze cel heeft een rendement van 6,8%. De cel bevat alleen een Ag achterreflector. Met een toegevoegde ZnO laag

bij de achterreflector zal het rendement hoger zijn. Nu vergelijken we deze cel met een standaard amorf silicium zonnecel. Het rendement is wat lager dan die van de standaard cel die op een commerciële u-type SnO₂ bedekt glas van Asahi Co. is gemaakt. Het rendement van de standaard cel is 9.0% met alleen een Ag achterreflector. Met een ZnO/Ag achterreflector is het verwachte rendement van dit soort zonnecellen rondde 9,7%. We hebben echter een goede stroom gehaald. Het lagere rendement is hoofdzakelijk te wijten aan de slechte vulfactor (FF), die we aan de hoge weerstand toeschrijven. Dit zou uit de ZnO/p-laag grens of het slechte contact met de zigzag structuur kunnen voortvloeien. De spectrale respons van deze twee soorten cellen zijn vergeleken. In Figuur 30b is een toename van de spectrale respons bij hoge golflengtes, tussen 500 en 650 nm, zien. Een hogere absorptie in het gebied van 500 tot 650 nm voor het zigzagmateriaal is duidelijk zichtbaar. Hierbij moet in aanmerking genomen worden dat de absorptie van het zigzag glas (vanwege het dikke en goedkope glas dat ook enige absorptie zal hebben) groter zal zijn dan van het Asahi glas (slechts 1mm dik). We hebben toch een boeiend resultaat gehaald. Met toevoegde ZnO bij de achterreflector, zullen we een rendement van 8% bereiken. Om een rendement van meer dan 10% te halen zal de serie weerstand verminderd moeten worden. Dit is mogelijk door het oplossen van contact problemen.

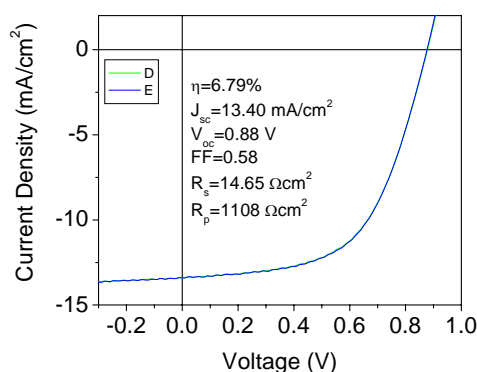


Fig. 30a IV-karakteristiek van een PIN zonnecel op zigzag materiaal

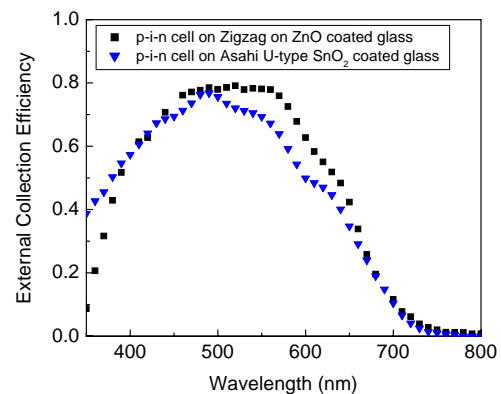


Fig. 30b Spectrale respons van een p-i-n cell met een Asahi U-type TCO en Zigzag glass/ZnO

5.3 Kunststof Substraat

Met het succes van de cel op zigzag glas, was onze volgende stap de depositie op zigzag gestructureerde kunststof substraten. We zijn voorzien van drie soorten substraten, die we respectievelijk “ZZ1”, “ZZ2” en “Flower substraat” hebben genoemd. Uiteraard moet de temperatuur van depositie laag genoeg blijven, afhankelijk van de deformatietemperatuur van de kunststof. We hebben de proefcellen van het p-i-n type op glassubstraten gemaakt. Het zorgvuldig ontwikkelen van zowel intrinsieke lagen, die onder hoge verdunning van silaan met

waterstof zijn gedeponerd, als de gedoteerde lagen, die bij 100 graden zijn gedeponerd leidde tot zonnecellen met een goed rendement (7.2%). Het is tot nu toe het hoogste rendement van de lage temperatuur gedeponerde amorfsilicium zonnecellen gemeld. Een eerste poging om deze

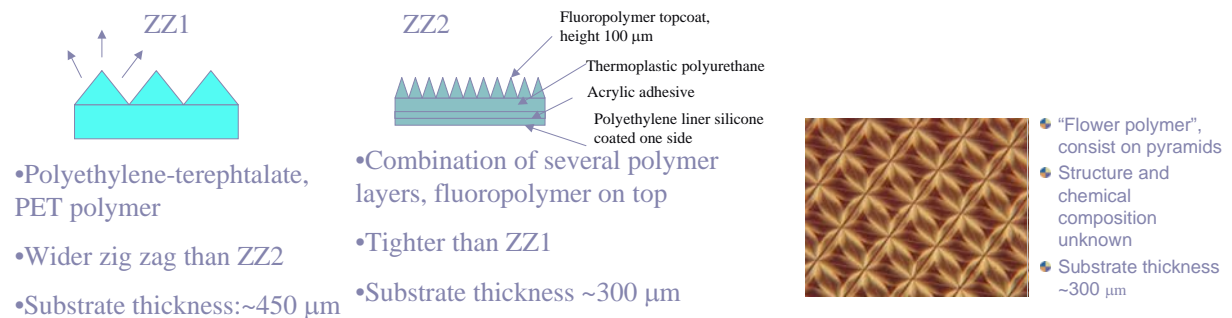


Fig.31 Drie kunststof films: ZZ1, ZZ2 en flower structuur met een micro-V structuur

cel in een keer op micro-V substraten te maken is mislukt. Alle cellen zijn geshunt (kortgesloten). We maakten ook cellen met nip structuur, zoals Ag/NIP/ITO/Au of Ag/ZnO/NIP/ITO/Au, gedeponerd op de drie soort substraten. Maar, die cellen zijn ook geshunt (kortgesloten). Na de eerste tegenslag op Micro-V kunststof, probeerden we het shunting (kortsluiting) probleem te oplossen. We hebben ons gefocust op de interne en externe stress. De externe stress wordt veroorzaakt door het verschil in uitzettingscoëfficiënt van het substraat en de dunne lagen. Het ionenbombardement bij opdampen draagt ook bij aan de

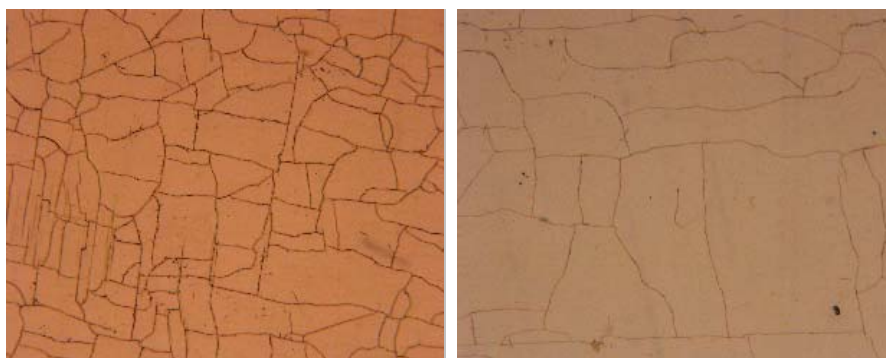


Fig.32 Optische microscoop beelden van de ITO lagen op PET polymeer met verschillende depositie snelheden: links 300 W, rechts 150 W

stress. We ontdekten de juiste depositie condities voor de TCO laag (ITO) op het kunststof (frontcontact) en de TCO laag (ZnO) op de pin structuur (achterreflector). De beide materialen zijn door de RF magnetron sputtering gemaakt. We ontdekten dat de substraattemperatuur na enige tijd van de depositie toenam (vermoedelijk door het ionenbombardement) hoewel de substraatverwarmer op kamertemperatuur werd gezet. Dit effect veroorzaakt de stress en het

krullen van het substraat. Er ontstaat een hoge weerstand in het TCO (ITO op PET). Daarom besloten we om het vermogen tijdens de ITO depositie te optimaliseren en ook een goede afkoelingsmethode te vinden. We ontdekten dat inderdaad de stress aanzienlijk minder is naarmate het vermogen lager is. In figuur 32 laten we het optische microscopie beeld van de ITO lagen die op het commercieel vlak PET folie gedeponerd zijn, zien. Een behoorlijke vermindering van het aantal scheuren in de film is te zien. Dit effect leidt tot een verbetering van de weerstand (Fig. 33). Verlenging van de afkoeltijd na de depositie verbetert ook aanzienlijk de weerstand. Wat het ZnO als achterreflector betreft ontdekten we dat het probleem met scheuren minder erg is als hij onder standaard condities opgebracht wordt. Toch hebben we een lager vermogen gebruikt om de stress te verminderen.

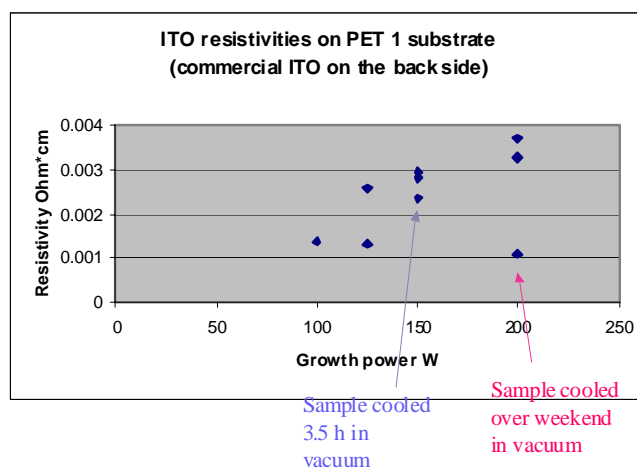


Fig.33 Het effect van koeling en depositievermogen op de weerstand van de ITO sheets.

Met de bovengenoemde ontwikkelingen, zijn de amorf silicium pin cellen op het ITO beklede PET folie gemaakt. De cellen met zowel ZnO als zonder ZnO achterreflector werkten. Hoewel de opbrengst nog groter moet zijn behaalden we een goed rendement. De I-V karakteristiek van de zonnecellen op het ITO beklede PET (met een pre-hardcoating van de ITO aan de andere kant) wordt in Figuur 34 weergegeven. Een rendement van 3% is bereikt.

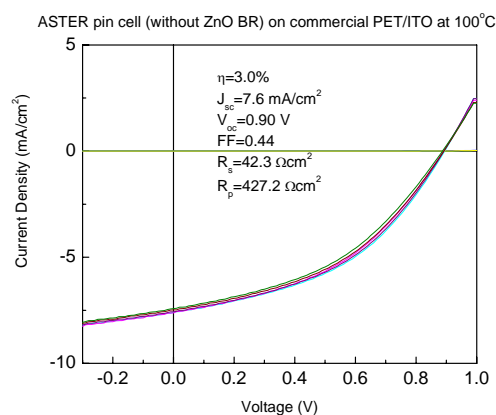


Fig.34 IV karakteristiek van amorphe silicium pin zonnecellen gemaakt met ITO gecoate PET substraten.

Vergelijkbare pin cellen zijn gemaakt op andere soort commercieel PET (zonder pre-hardcoating). Het rendement van de cellen is bepaald op 2,4% en 2,7% respectievelijk zonder en met ZnO achterreflector.

Zodra we slaagden met pin cellen op commercieel kunststof met een vlak oppervlak, hebben we een poging gedaan om de pin cellen op micro-V kunststof te maken. Er zijn twee verschillende type cellen vervaardigd zoals weergegeven in tabel 5 met vermelde aanpassingen.

Tabel 5 Resultaten van de amorf silicium p-i-n- cel op vlat PET polymeer zonder een hardcoating

Cell type	Eff	Voc	FF
Pin cel zonder ZnO achterreflector (de beste cel)	2,4 %	0,82	0,44
Pin cel met ZnO achterreflector (de beste cel)	2,7%	0,79	0,42

Eerst is geprobeerd de depositie parameters van de TCO lagen aan te passen volgens de methode zoals toegepast de pin cellen op vlak PET. De buffer/protectie lagen op het Micro-V kunststof waren gebruikt als (i) bescherming tegen gas of andere verontreinigingen (ii) een betere hechting (iii) reductie van de absorptie van vocht.

Al₂O₃ bufferlaag: Er zijn 2 soorten Al₂O₃ materialen geprobeerd.

(a) Gesputterd Al₂O₃ op ZZ2 substraat: Substraat zette uit en de films waren geel.

(b) ALD Al₂O₃ op ZZ2 en “flower polymer”: De films waren transparant.

Uit deze deposities blijkt dat Al₂O₃ een goede protectie laag voor fluoropolymer substraat (ZZ2) is. Zonder een protectie laag wordt dit substraat met ITO depositie bruin. Voor andere substraten was er geen zichtbare invloed van de protectielaag. Ze hebben een typische kleur van het ITO, als de protectie laag is gebruikt of niet.

In figuur 35 is de plaatsing van de verschillende substraten in het sputterapparaat weergegeven. Met het sputterapparaat is ITO op Al₂O₃ en zonder Al₂O₃ beklede ZZ substraten gedeponeerd. In figuur 35 en de gemeten serieweerstand weergegeven. ZZ1 had de laagste weerstand, dus is het als het eerste zigzag substraat voor zonnecellen is gekozen.

Er zijn 2 soorten cellen gemaakt: ZZ1(PET)/ITO/ pin/ ZnO / AgAl en ZZ1(PET)/ITO/pin /AgAl. Helaas, alle cellen zijn geshunt. In dit geval was het etsen van ZnO funest voor de cellen met ZnO achterreflectoren.

We probeerden om deze soorten cellen op “flower polymer” te maken. De cellen zagen er goed uit en er was geen zichtbare stress. Maar helaas bleken ook deze cellen geshunt (kortgesloten).



Fig. 35 Plaatsing van de verschillende micro-V substraten in het sputter systeem met bijbehorende sheet weerstanden voor 800 nm dit ITO.

Toekomstige mogelijkheden

In het begin van dit onderzoek over micro-V kunststof, was gepland om de reeds ontwikkelde hoog rendement single junctie (a-Si) en tandem micromorf cel te implementeren. De rendementen zijn een van de beste ter wereld. Maar het blijkt dat het depositieproces bij lage temperatuur op kunststof, speciaal op het Micro-V gestructureerde substraat complexer is dan verwacht. Binnen de beschikbare mankracht en machinetijd konden niet alle problemen worden opgelost. Toch is wel het belangrijke probleem van de “extrinsic stress” zo veel mogelijk opgelost.

Twee andere problemen moeten nog opgelost worden voordat Micro-V succesvol is:

- (1) De afname van de innerlijk stress in de pin cel, die van de depositietemperatuur en plasmacondities (ook waterstof verdunning) afhankelijk zou zijn.
- (2) De defecten in de silicium laag die door de depositie op de V-type structuur zijn veroorzaakt. Het is bekend dat een defectieve laag in de groeirichting van de structuur optreedt als de silicium laag op een V-type structuur wordt gedeponerd. Het schaduw effect tijdens het sputteren van TCO op de V-structuur heeft ook een invloed.

Vanwege de bovengenoemde punten is het logische om meer onderzoek op de toepassing van micro-V kunststof te richten. De verwachting is dat met meer gerichte inspanning de problemen kunnen worden opgelost. In het huidige haalbaarheidsonderzoek was hiervoor geen ruimte meer.

6 Conclusies en aanbevelingen

Uit dit onderzoek is gebleken dat het standaard zigzag polycarbonaat materiaal zoals gebruikt in kassen minder geschikt is als afdek materiaal voor zonnecollectoren en fofovoltaïsche cellen. Bij zonnecollectoren kan een goed isolerend kunststof afdekkingsmateriaal problemen geven door het optreden van hoge stagnatie temperaturen. Uit de praktijk metingen blijkt dat het zigzag materiaal ontwikkeld voor kassen minder geschikt is voor zonnecollectoren omdat de grote luchtkamers minder goed isoleren. Met kleinere luchtkamers is de verhoogde opbrengst in de praktijk wel haalbaar. Tevens bleek dat bij grotere invalshoeken dwars op de zigzagstructuur een hogere lichttransmissie resulteert in een hogere opbrengst.

Daarom is een nieuwe type plaat- en folie-afdekking ontwikkeld met een veel kleinere zigzagstructuur die Micro-V vormgeving genoemd wordt. Dit nieuwe afdekkingsmateriaal is toe te passen voor zonnecollectoren en fofovoltaïsche cellen. Raytracing berekeningen voor zonnecollectoren tonen aan dat dezelfde lichttransmissieverhoging bereikt kan worden als die bij zigzag materiaal, namelijk 6 % verhoging over het gehele zonnenspectrum ten opzichte van afdekking met een vlakke plaat. Voor hoge temperatuur toepassingen van zonnecollectoren kan het momentane rendement ca 50 % toenemen met een dubbele afdekking door de hogere isolatiewaarde met behoud van de lichttransmissie.

Aan de hand van simulatie berekeningen is een extra jaaropbrengst van 4 % voor zonnecollectoren bepaald door in plaats van standaard glas een Micro-V materiaal toe te passen. Met dubbel Micro-V glas is de extra jaaropbrengst 9 % door de hogere isolatie waarde.

Bij fofovoltaïsche cellen is vooral de grote hoogte van het zigzagmateriaal van 40-70 mm een probleem om gelijkmatig een dunne laag op het oppervlak te laten aangroeien. Daarom biedt de Micro-V structuur of micropiramides in glas of foliemateriaal voordelen. Voor loodrecht opvallende straling ligt hier de optimale hoek tussen de 40° en 50°. Bij diffuus opvallende straling is de optimale hoek groter en ligt tussen de 60° en 80°.

Bij cellen met kleine laagdikte (500nm) is de rendementverbetering hoger dan bij dikkere lagen (2000nm). Een rendementsverhoging van 55% is mogelijk door micropiramides toe te passen. Een vierkant of hexagonaal piramidegrondoppervlak geeft voor loodrecht opvallende straling weinig verschil. Met de aanname dat het rendement evenredig is met de stralingsabsorptie van de cel is de rendementverhoging te berekenen waarbij de absorptie bij nul graden op een rendement van 100%. kan worden gesteld. Met micro-V groeven is een rendementverhoging van 47,6% mogelijk voor loodrecht opvallende straling. Met micropiramides is dit bijna 55%. Hoewel de micropiramide een iets hoger rendement geeft is het voordeel van de Micro-V structuur dat deze oppervlakken beter schoon blijven door een betere waterafloop. Bij de aangroei van PV cellen op een micro-V structuur kunnen problemen optreden door hoge materiaalspanningen, te hoge depositietemperaturen en het te dun worden van de gedoteerde lagen. Door deze problemen is het in dit eerste verkennende onderzoek nog niet mogelijk

geweest de theoretische voordelen met experimenten aan te tonen. Via aanvullende onderzoek van NEO of Glami zal het micro-V materiaal verder ontwikkeld worden voor toepassingen in zonnecollectoren, PV-cellen en de tuinbouw.

7 Literatuur

- [1] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal Processes, Second Ed., John Wiley & Sons, New York, 1991
- [2] S. Furbo, L.J. Shah, Thermal advantages for solar heating system with a glass cover with antireflection surfaces, *Solar Energy*, 75, pp. 513-523
- [3] P.J. Sonneveld , G.L.A.M. Swinkels and D. Waaijenberg, 2002, Greenhouse design for the future, which combines high insulation roof material with high light transmittance, Paper no. 02SE013, International Conference on Agricultural Engineering (AgEng), Budapest, Hungary, 30 June - 4 Juli 2002, pp. 8
- [4] P.J. Sonneveld, , F.Adriaanse, 2002, New Energy Saving Greenhouse Roof with a High Light Transmittance - Zigzag greenhouse glazing, Paper no. 02SE004, International Conference on Agricultural Engineering (AgEng), Budapest, Hungary, 30 June - 4 Juli 2002, pp. 102
- [5] P.J. Sonneveld, J.J.G. Breuer, J.B. Campen, G.L.A.M. Swinkels en D. Waaijenberg, Ontwikkeling van een Hoog Isolerend Zigzag-vormig Kasdek met een Geoptimaliseerde Lichttransmissie, Nota P2001-88, september 2001, IMAG B.V. Wageningen
- [6] S.R. Wenham, M.A.Green,. and M.E Watt, "Applied Photovoltaics", Appendix B, (Bridge Printery, Sydney, 1994). (\Spectra\Key Centre for Photovoltaic Engineering UNSW - Air Mass 1_5 Global Spectrum.htm)
- [7] W. Wunderlich, Transparante Kunststoffe, SKZ Würzburg, 30-31 may 2001
- [8] M. Boroditsky, R. Ragan, E. Yablonovitch, Absorption enhancement in ultra-thin textured AlGaAs films, *Solar Energy Mateials & Solar Cells*, 57 (1999) 1-7

8 Publicaties

- [1] P.J. Sonneveld and G.L.A.M. Swinkels, Micro-V covering materials for photovoltaic cells, 20th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, CCIB Barcelona Spain, 6-10 June 2005, 5BV 4.41
- [2] P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, Micro-V Covering Materials with High Light Transmittance for Solar Collectors, Eurosun conferentie Freiburg, 20-24 june 2004
- [3] P.J. Sonneveld and G.L.A.M. Swinkels, New Energy saving greenhouses with high light transmittance, Practical Hydroponics & Greenhouses, july/augustus 2005, p.34
- [4] P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, New Developments of Energy-saving Greenhouses with High Light Transmittance, Landwards, 59 no.6 (2004) p4
- [5] P. Voorter, Meer warmte uit zon met ribbeltjesglas, Stroom, Nr. 8, 8 mei 2004 (naar aanleiding van een interview met P.J. Sonneveld)
- [6] P.J. Sonneveld , G.L.A.M. Swinkels and D. Waaijenberg, New Developments of Energy-saving Greenhouses with High Light Transmittance, Book of Abstracts, Greensys2004, september 12-16, p91

9 Bijlage A Resultaten Collector Inalfa Ares

In Fig. 36 is het collector afdek materiaal van Inalfa Ares weergegeven. Bij deze collector is de boiler ingebouwd en vindt het warmtetransport naar de boiler plaats door middel van een heatpipe principe. Het voordeel hiervan is dat hierdoor het warmtetransport in hoge mate in één richting plaatsvindt, namelijk naar de boiler toe.

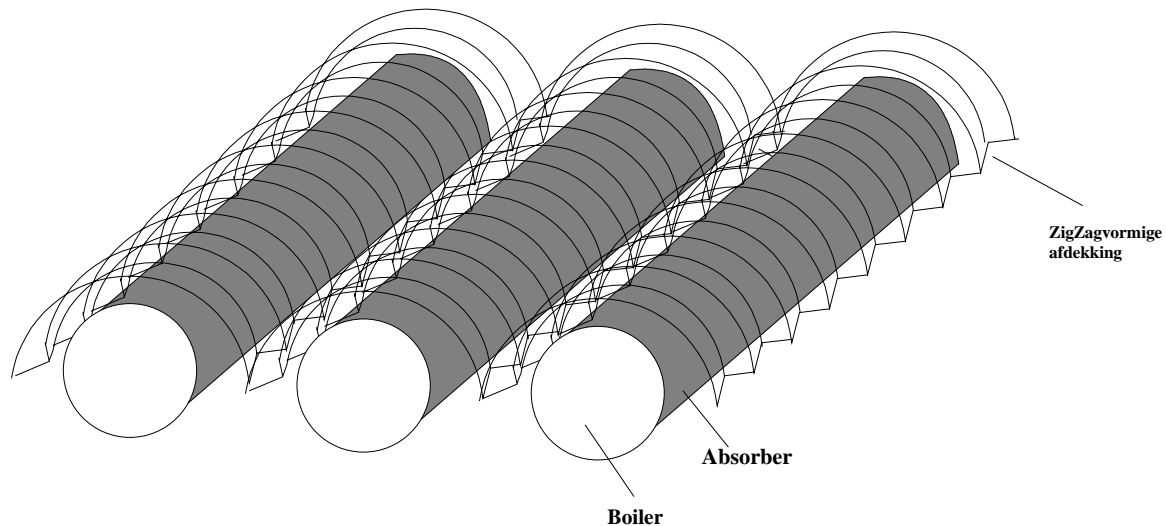


Fig. 36 Inalfa Ares zonnecollector met transparante zigzagafdekking.

Raytracing berekeningen hebben aangetoond dat voor de gewelfde afdekking van de Inalfa Ares collector dezelfde toename in lichttransmissie ontstaat als in vlakke collectorafdekking zoals in de Figuren 2 en 3 voor respectievelijk direct en diffuus opvallend licht is aangegeven. Ook het toepassen van een dubbele afdekking zal hierdoor een vergelijkbaar effect hebben op de lichttransmissie en het warmteverlies. Daarom kunnen de conclusie met betrekking tot de jaaropbrengst van een vlakke collector, zoals samengevat in Tabel 3 voor de Inalfa Ares collector overgenomen worden