

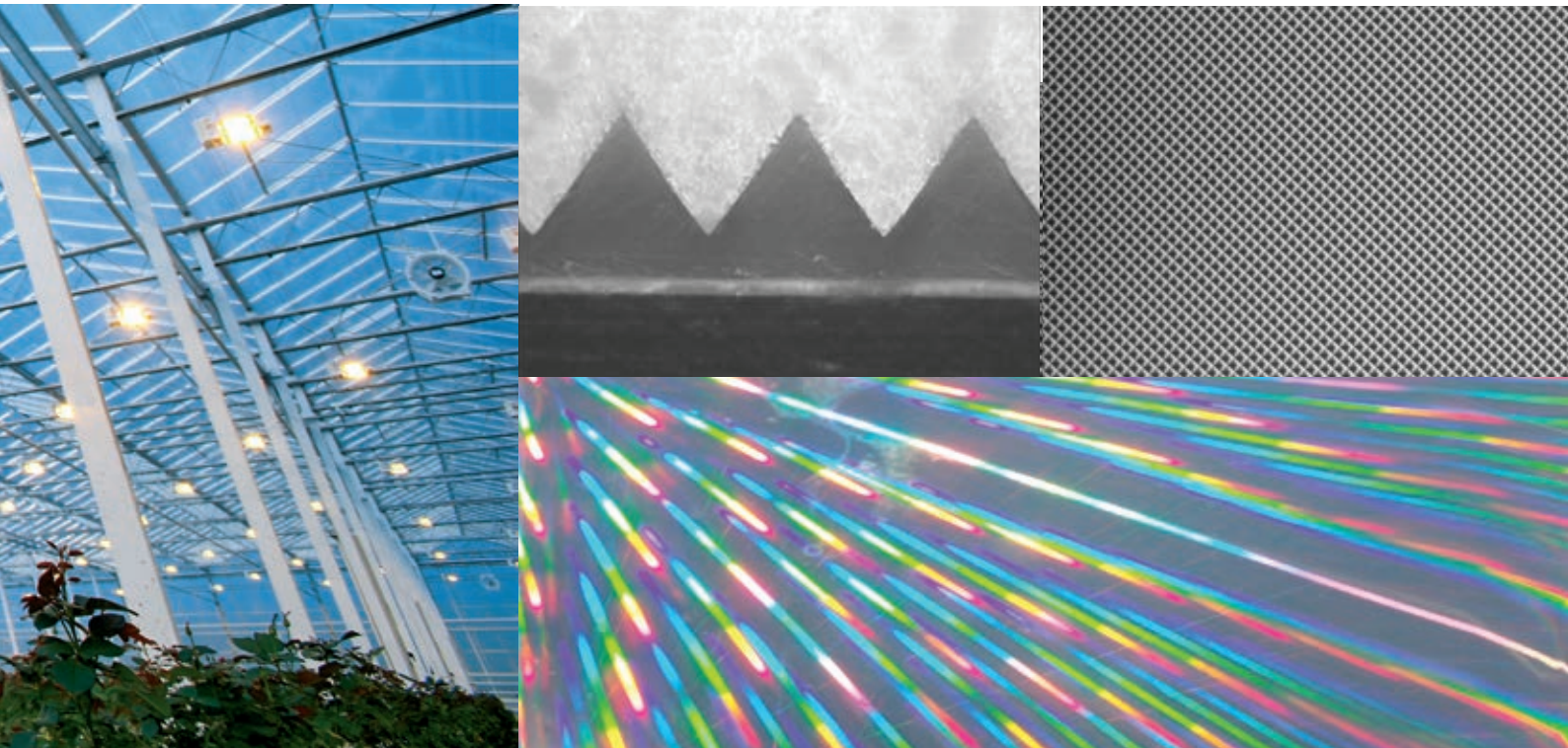


Ultra-energiezuinige kassystemen met Supertransparante Micro-V Gestructureerde materialen

Rapportage in het kader van het EOS-LT programma van Agentschap NL
(Openbare versie)

Th.H. Gieling¹, J. van Ruijven¹, G.J. Swinkels¹, H.J. Holterman¹, V. Mohammadkhani¹, M. Ruijs¹,
C. van Rijn², J. Baggerman², J. Rath³, M. de Jong³, R. Schropp³

¹Wageningen UR Glastuinbouw (penvoerder), ²Aquamarijn, ³Universiteit Utrecht



Referaat

Onderzoek is uitgevoerd naar het toepassen van micro- en nanostructuren om de hemisferische transmissie en de diffusiviteit van kasdek materiaal en de efficiëntie van zonnecellen te verbeteren. In theorie levert een dubbelzijdig gestructureerd micro-V gestructureerd kasdek materiaal een toename in transmissie van 7%, terwijl metingen een verlies van 6% ten opzichte van het vlakke uitgangsmateriaal laten zien. Structuren uit andere industrieën laten potentie zien in het verhogen van de transmissie, maar geen enkele van de onderzochte diffuse combinaties van motheeye, microlens en circulaire diffusor laten die verhoging daadwerkelijk zien. Interessante lichtspreadingpatronen zijn gevonden, maar het effect van deze patronen op de plantproductie is (nog) niet bekend. Dubbelzijdig toegepaste motheeye structuren verhogen de hemisferische transmissie met 8%, maar hebben geen diffuse uitstraling. De structuren laten geen zelfreinigend effect zien en bij condensatie vormen zich waterdruppels op het oppervlak van het glas, wat de transmissie niet ten goede komt. De materialen moeten zorgen voor een toename in de productie van 2,5-4% voor tomaten, 1-2% voor roos en 0,5-1% voor Phalaenopsis óf een jaarlijkse energiebesparing van minimaal 3,5-6,5 m³/m² om de geraamde additionele investering van 9-16€/m² terug te verdienen. Drie typen structuren zijn toegepast als light trapping devices in dunnefilm polycarbonaat zonnecellen: Asahi U-type, nanopiramides en micropiramides. Nanopiramides op PC zorgden voor een efficiëntie van 7.4%, waarbij de stroomdichtheid iets hoger is dan voor Asahi U-type, maar de Voc lager is. Micropiramides haalden een efficiëntie van 6.4%. Tandem cellen (a-Si:H/nc-Si:H) laten een efficiëntie van 9.5% zien. Wanneer dit wordt toegepast op PC, wordt de stroomsterkte erg laag, door veranderd nucleatie gedrag.

Abstract

Micro and nanostructuring of greenhouse covering materials is investigated to increase the hemispherical transmittance and diffusivity. This is also applied to PV cells, to increase efficiency of light trapping. In theory, a two-side micro-V structured material can increase transmittance with 7%, while measurements show a loss of 6% compared to the flat reference material. Structures from other industries show potential for increasing of the hemispherical transmittance. Non of the investigated diffuse structure combinations, however, actually show this increase. Interesting scattering patterns are found for these samples, but the effect of this on crop production is not (yet) known. Two-sided motheeye structures show an increase in transmittance, but don't have a diffuse character. Non of the investigated structures showed characteristics of the Lotus (self-cleaning) effect. Condensation of water on the surface will be dropwise, which is not beneficial for transmittance. For this type of greenhouse covering materials to be economically feasible, an increase in crop production of 2.5-4% for truss tomato, 1-2% for rose and 0.5-1% for Phalaenopsis ór a reduction in energy use of 3.5-6.5 m³/m² is required to be able to earn back the additional investment of 9-16 €/m². Three types of structures have been applied as light trapping devices to thin film PC PV-cells: Asahi U-type, nanopyrramids and micropyrramids. An efficiency of 7.4% was achieved with nanopyrramids on PC, in which current density is a bit higher than for Asahi U-type, while Voc is lower. Micropyrramids reach an efficiency of 6.4%. Tandem cells (a-Si:H/nc-Si:H) show an efficiency of 9.5%. . When this recipe was transferred to PC substrates, the crystal nucleation behaved differently, resulting in a-Si:H/a-Si:H tandem cells, which suffer from a very low current, due to bad current matching.

© 2013 Wageningen UR Glastuinbouw. Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen, Postbus 644, 6700 AP Wageningen

Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen,
Postbus 644, 6700 AP Wageningen
Tel. : +31 (0) 317 481 387
Fax : 010 - 522 51 93
E-mail : jim.vanruijven@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	Voorwoord	5
	Leeswijzer	7
	Summary	9
1	Supertransparant kasdek materiaal (Wageningen UR Glastuinbouw)	13
1.1	Introductie	13
1.1.1	Aanleiding	13
1.2	Literatuurstudie	15
1.3	Materiaal en methode	20
1.3.1	Methoden voor aanbrengen van structuren	20
1.3.1.1	Randvoorwaarden	20
1.3.1.2	Warm embossen	20
1.3.1.3	Embossen in laklaag	22
1.3.1.4	Laserbewerken	23
1.3.1.5	Bestralen met micropoeder	24
1.3.2	Productiemethode testsamples	24
1.3.3	Modelsimulaties	26
1.3.3.1	Microstructuren	26
1.3.3.2	Nanostructuren	28
1.3.4	Metingen	29
1.3.4.1	Lichttransmissie	29
1.3.4.2	Lichtspreading	30
1.3.4.3	Contacthoekhysterese	30
1.3.4.4	Emissiviteit	31
1.3.5	Niet-technische bespiegelingen	31
1.3.5.1	Economische haalbaarheid	31
1.3.5.2	Sociaal-wetenschappelijke aspecten	32
1.4	Resultaten	32
1.4.1	Modelberekeningen	32
1.4.1.1	Microstructuren	32
1.4.1.2	Nanostructuren	34
1.4.2	Metingen	37
1.4.2.1	Micro-V structuur	37
1.4.2.1.1	Lichttransmissie	37
1.4.2.1.2	Lichtspreading	39
1.4.2.2	Microlens, motheye en diffusor	40
1.4.2.2.1	Lichttransmissie	40
1.4.2.2.2	Lichtspreading	43
1.4.2.2.3	Overige eigenschappen: contacthoekhysterese en emissiviteit	44
1.4.2.2.4	Samenvatting technische prestaties	46
1.4.3	Niet-technische bespiegelingen	46
1.4.3.1	Economische aspecten	46
1.4.3.1.1	Economische analyse	46
1.4.3.2	Toekomstperspectief	49
1.4.4	Sociaalwetenschappelijke aspecten	50
1.4.4.1	Sociale kenmerken van technische innovaties	50

	1.4.4.2	Toekomstverkenningen	51
	1.4.4.3	Innovatieproces	52
	1.5	Toepassing	52
	1.6	Discussie	53
	1.7	Conclusies en Realisaties	55
	1.7.1	Conclusies	56
	1.7.2	Realisaties	57
	1.8	Referenties	58
Bijlage I		Sterkte-analyse structuren in glas	65
Bijlage II		Opzet plantproeven met experimenteel kasdek materiaal	67
Bijlage III		Verkenning meting hemisferische transmissie onder condens omstandigheden	71
Bijlage IV		Investeringen en kosten van doorontwikkeling en productie van kasdek materialen met micro-V of nano-structuren	73
Bijlage V		Relatie investeringsruimte (investment capacity) en extra productie voor de teelt van tomatomaat, roos en Phalaenopsis	77
2		Gestructureerde flexibele PV-cellen (Universiteit Utrecht)	79
	2.1	Inleiding	79
	2.1.1	Aanleiding	79
	2.1.2	Doelstelling	79
	2.2	Materiaal en methode	80
	2.3	Resultaten	82
	2.3.1	Nanocrystalline silicon cells	85
	2.3.2	Tandem cells	85
	2.4	Discussie	89
	2.5	Conclusie en aanbevelingen	91
	2.6	List of Publications	91
3		Structureren van polycarbonaat (Aquamarijn)	93
	3.1	Inleiding	93
	3.1.1	Aanleiding	93
	3.1.2	Doelstelling	93
	3.2	Resultaten en Discussie	93
	3.2.1	Micro-V	93
	3.2.2	Micropiramides	94
	3.3	Conclusies	95
	3.4	Referenties	96

Voorwoord

Het onderzoek naar micro- en nanostructuren op lichtdoorlatende materialen, dat onderwerp is van dit rapport, is uitgevoerd in het kader van het EOS-LT subsidieprogramma, waarin onderzoek naar energie-technologieën voor implementatie op de lange termijn wordt ondersteund. Het Ministerie van Economische Zaken (voormalig LNV en EL&I; in de persoon van L. Oprel) treedt via AgentschapNL (in de persoon van M. Dieleman) binnen dit subsidieprogramma op als financier. De glastuinbouwsector financierde het project via ondersteuning door het Productschap Tuinbouw te Zoetermeer (in de persoon van D. Medema). Dank gaat uit naar de financiers die het onderzoek mogelijk hebben gemaakt.

Het project is uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen Wageningen UR Glastuinbouw, Universiteit Utrecht en Aquamarijn Micro Filtration BV. Aan het resultaat van het project werd in belangrijke mate bijgedragen door de bedrijven Pulles & Hanique (als opvolger van Philips Lighting) en Nanoptics (als opvolger van Fuji Film). De goede samenwerking van de medewerkers uit de universiteiten en bedrijven en de vele vruchtbare discussies hebben geleid tot het hier gepresenteerde resultaat.

Na complexe modelberekeningen op de afdelingen van de universiteiten, werden op basis hiervan samples vervaardigd door de betrokken bedrijven. De lichteigenschappen van de samples werden gemeten en beoordeeld met instrumenten op de laboratoria van de Universiteit Utrecht, Wageningen UR Glastuinbouw, Pulles & Hanique en Philips Lighting. Mogelijke alternatieven werden ter discussie gesteld in samenspraak met de bedrijven OM&T, Nanoptics en C-coatings.

Een afsluitende workshop wordt georganiseerd om de klankbordgroep te informeren.

Deze klankbordgroep bestaat uit: LTO Nederland, AVAG, Scheuten Solar Systems BV, Bosman BV, van Diemen BV, Westland Infra BV. Andere potentiële gebruikers van de resultaten van dit onderzoek worden uitgenodigd deel te nemen aan deze bijeenkomst.

Als coördinator ben ik dank verschuldigd aan het hele projectteam, met name:

De financiers: Leo Oprel, Dennis Medema en Maus Dieleman

De onderzoekers: Silke Hemming, Piet Sonneveld, Cees van Rijn, Jacob Baggerman, Jatin Rath, Minne de Jong, Gert-Jan Swinkels, Vida Mohammadkhani, Henk Jan Holterman, Marc Ruijs, Jim van Ruijven, Jan Meiling en Gerard Pitlo.

De medewerkers van de betrokken bedrijven: Hans Galenkamp, Berry Crombach, René Wilde, Florian Mildner, Robert Herre, Wilfried Schipper, Volkmar Boerner, Niels Kuijpers, Jan M. ter Meulen, Mark Steltenpool.

Theo Gieling (Projectcoördinator)

Leeswijzer

In dit document zijn de rapportages van Wageningen UR Glastuinbouw (Hoofdstuk 1), Universiteit Utrecht (Hoofdstuk 2) en Aquamarijn BV (Hoofdstuk 3) samengevoegd.

De Samenvatting kan worden gelezen als een managementsamenvatting en ook worden gebruikt voor refererende artikelen in de vakpers.

In Hoofdstuk 1 treft u het verslag aan van het onderzoek dat is uitgevoerd op Wageningen UR Glastuinbouw naar supertransparante kasdekmaterialen. Het is ook een weergave van de inspanningen van de bedrijven Nanoptics, Pulles & Hanique en C-coatings. De bijlagen, die betrekking hebben op deze rapportage, zijn direct achter Hoofdstuk 1 opgenomen. Dit hoofdstuk bevat een uitgebreide literatuurstudie m.b.t. het belang van licht in kassen, de invloed van structuren op de licht transmissie, de verschillende vormen waarin licht het gewas bereikt en de invloed van structuren op de condensvorming en de vervuiling/zelfreiniging. "Materialen en Methoden" besteedt aandacht aan de modelberekeningen, de meetmethoden en het maken van samples met structuren.

In Hoofdstuk 2 treft u een verslag aan van het onderzoek dat is uitgevoerd door de Universiteit Utrecht naar gestructureerde flexibele PV cellen. Het hoofdstuk bevat een literatuurstudie, een overzicht van de gebruikte materialen, methoden en conclusies

In Hoofdstuk 3 treft u de bijdrage van Aquamarijn BV aan m.b.t. het produceren van samples met verschillende micro- en nanostructuren op polycarbonaat.

Summary

The program 'Kas als Energiebron' states the ambition in the Dutch horticultural sector as "...to achieve economically feasible climate neutral crop production in newly built greenhouses in 2020" (Kas als Energiebron, 2011). The transition pathway 'Light' from this program has two directions: more efficient use of artificial lighting and more efficient use of natural light. Light is the most important factor in crop production, by feeding energy into the plants' photosynthetic system. Until now, smarter implementation of flexible screening, temporal coatings and the use of innovative greenhouse covering materials achieves more efficient use of natural light. A reduction in the reflectance and absorbance of the material increases the amount of light available for plant growth. Implementation of anti-reflective coatings to improve on the diffuse character of the material and increase the insulation value of greenhouse covering materials, are a leap forward for the improvement of the hemispherical transmittance. These characteristics combine into a super-transparent greenhouse cover with good insulation. However, at the start of the here described research project, transmittance of state-of-the-art greenhouse covering materials, as applied in practice, was at such a low level, that several different pathways could be taken to find improvement.

The ZigZag covering material, as a result of earlier research (Sonneveld, 2001, 2002), introduced a material that combines characteristics as described above. This double layer material has the same hemispherical transmittance as single glass, but has a much higher insulation value. A zigzag structure with decreased size on the surface of the glass, the so-called micro-V structure, is the starting point for the here described research. Hence, the goal of this research is to find an optimal combination of micro- and nanostructures for the creation of diffuse greenhouse covering material with a high hemispherical transmittance. Industry took a competitive pathway to this approach by the application of multi-layer anti-reflection coatings.

A literature study on optical characteristics of micro- and nanostructures used in the photovoltaic industry (production of electricity with solar panels, to be named PV-industry from now on) is the starting point. In this industry the efficiency of use of natural light is equally important as in horticulture. Reflection from the solar panel covering material reduces the efficiency of electricity production. Application of micro- and nanostructures on the surface of the cover material, decreases reflectivity and improves the incoupling of light within the panel (Gombert, 1998). In interaction with this literature review an optimisation to hemispherical transmittance is performed with raytracing software for a variety of microstructures and nanostructures. A couple of microstructures is selected for further investigation, based on knowledge from both the literature review and simulations on the potential improvement of the hemispherical transmittance.

To be able to create samples with microstructures on the surface, a production method had to be selected. Replication by means of embossing showed to be a good way to produce large surface areas of structured material. However, hot embossing of structures into warm glass during the production process showed to be infeasible, as the liquid material is pushed out of the embossing unit. This is a general problem for application of structures in the glass, as the production of clear glass is done on liquid tin. Reheating of the glass material after the production process takes more energy than it will ever save in the greenhouse. Therefore, a choice is made within this research to put a layer of UV-curable resin on the surface of the glass, in which the micro and nanostructures can be embossed. It is technically feasible to scale up this process, in order in future to enable the production of square kilometres of structured greenhouse covering materials.

Structures with a size between $5\mu\text{m}$ and 1mm can be called microstructures, and for these structures the laws of classical optics apply: reflection and transmittance occur depending on the refractive index of a material. Part of the reflected radiation can be added to transmittance by incoupling of the reflected light in the next repetition of the microstructure pattern. Raytracing software (Spencer & Murty, 1962) applies these laws of classical optics to calculate the effect of microstructures on the hemispherical transmittance of transparent materials. An optimisation is performed on the micro-angle of the micro-V structure. It showed that only a two-side applied micro-V structure creates an increased transmittance. Pyramidal structures in a variety of configurations did not increase transmittance. For the micro-V structure, a micro-angle of 49° proved to be optimal, with an increase in transmittance of 7% compared to flat reference material. It also showed that a shift in micro-angle of more than 3° even decreased transmittance. Measurements on a micro-V sample structured

on both sides with a micro-angle of 49° did not show an increase in transmittance, but even decreased transmittance by 6.2%. Refraction of the light into the material (and therefore not into the greenhouse) is a possible cause for this difference.

If the size of the structures is smaller than the wavelength of light, the laws of classical optics don't apply anymore. The light does not experience the structures on the surface anymore, but instead experiences a gradual change in refractive index. Simulations are performed with a gradual change in this refractive index for a couple of structures. It is shown that an increased structure height creates an increased hemispherical transmittance for a nanostructure. Structures with a linear change in refractive index are sufficient for relatively small structure height. Structures with a more gradual change in refractive index prove to be more effective if the structure gets higher (at equal structure width). Theoretically, a hemispherical transmittance of 99.6% can be achieved by two-side application of these structures. Measurements on a sample with a two-sided motheye structure (not optimised according to the calculations) showed an increase in transmittance of 7%.

From the PV-industry, a motheye structure is combined with a microlens or an industrial available circular diffuser structure to come to a diffuse sample with a high hemispherical transmittance. The combination microlens/motheye decreases transmittance by 12%, motheye/diffuser by 10% and diffuser/microlens by 15%. While these structure combinations did not show an increase in transmittance, it showed interesting scattering patterns, which can possibly increase production compared to currently used diffuse glass. Contact angle measurements show that the investigated samples have a hydrophobic character, which means that water droplets are formed on the surface. It also showed that the Lotus (self-cleaning) effect is not achieved, as the water droplets stick to the surface of the material. If condensation is formed in the same way, transmittance during condensation will be decreased.

Economic and social aspects of applying microstructures are investigated as well. Results of the technical investigations did not yield possibilities to calculate actual pay-back times of investments in these materials. Therefore, the economic research is turned around: how much increase in production or reduction in energy use is required for the material to become economically feasible? Additional investments in micro-V or nanostructured materials are estimated to be 9-16 €/m² compared to tempered greenhouse glass. A minimal increase in production of 2.5-4% is required for truss tomato, 1-2% for rose and 0.5-1% for phalaenopsis, or a yearly decrease in energy use of 3.5-6.5 m³ of natural gas per square meter.

The pathway picked up by the glass production industry (anti-reflection coatings) creates diffuse greenhouse covering materials with high hemispherical transmittance. This diffuse, tempered and AR coated glass is an interesting alternative for common tempered glass, as it balances additional costs with an increase of income. Development of these materials create an additional threshold for micro-structured materials to become an interesting alternative for use in horticulture. Market for these high transmittance diffuse materials is mostly at locations where light and energy are limiting factors on yearly, weekly or even daily basis. High tech and mid tech greenhouses will be the first potential customers for micro-structured materials.

A conclusion can be drawn that structures from the PV-industry perform a different task there than what is expected in horticulture. While these structures increase the efficiency of electricity production from solar panels by improving the panel's light absorption, no increase in hemispherical transmittance is achieved. Therefore a potential follow-up research should focus on the development of new micro- and nanostructures, specially designed for horticulture, building on the knowledge created in this research. Durability of structures embossed into the UV-curable lacquer has to be investigated as well.

As a spin-off of the greenhouse project, Utrecht University applies the micro-V structure and micropyramids to improve the electrical performance of flexible PV-cells. The project aims to make high efficiency solar cells on micro-V structured plastic substrates which are mainly developed for greenhouse applications. Thin silicon based absorber materials were used to fabricate the solar cells. Thin silicon films can be produced by decomposing silane gas, using a plasma. In these types of processes, the temperature of the growing surface has a large influence on the quality of the grown films. Because plastic substrates limit the maximum tolerable substrate temperature, new methods have to be developed to

produce device-grade silicon layers. At low temperature, polysilanes can form in the plasma, eventually forming dust particles, which can destroy device performance. Studying the axial optical emission from the plasma, enables to identify whether dust particles are present in the plasma or not. Furthermore, the formation of polysilanes as a function of temperature was monitored by means of a mass-spectrometer. It was shown that the polymerization rate was influenced by the substrate temperature, which can explain the temperature dependence of dust formation.

As a substrate material for solar cells, we chose polycarbonate (PC), because of its excellent transparency and its relatively high glass transition temperature of 130-140 °C. At 130° we searched for deposition recipes for good quality silicon. By diluting the feedstock silane with hydrogen gas, the silicon quality can be improved for amorphous silicon (a-Si), until we reach the nanocrystalline silicon (nc-Si) regime. In the nc-Si regime, together with changing the power input into the plasma, the hydrogen dilution controls the crystalline fraction. With these layers, a-Si thin film solar cells were fabricated, on glass and PC substrates. The adverse effect of the low temperature can be mitigated by using thinner silicon layers. To get a good current, we need an adequate light trapping technique. We have simulated and experimentally tested three light trapping techniques, using embossed structures in PC substrates and random structures on glass: regular pyramid structures larger than the wavelength of light (micropyramids), regular pyramid structures comparable to the wavelength of light (nanopyramids) and random nano-textures (Asahi U-type). The use of microstructured and nanostructured substrates results in initial conversion efficiencies of 7.4%, compared to 7.6% for cells deposited under identical conditions on Asahi U-type.

We achieved 6.9% for nc-Si cells on texture etched aluminium doped zinc-oxide (ZnO:Al) on glass, using a very thin absorber layer of 750 nm. Combining a-Si and nc-Si cells we fabricated tandem solar cells at 130 °C. By optimizing the thicknesses of the different silicon layers and controlling the crystalline fraction of the bottom cell, we reached an initial conversion efficiency of 9.5% on texture etched ZnO:Al coated glass. On structured PC substrates, the crystal nucleation behaved differently. Changing the hydrogen dilution could solve this problem. The light trapping in structured PC substrates is less pronounced in the bottom cell, compared to texture etched ZnO:Al.

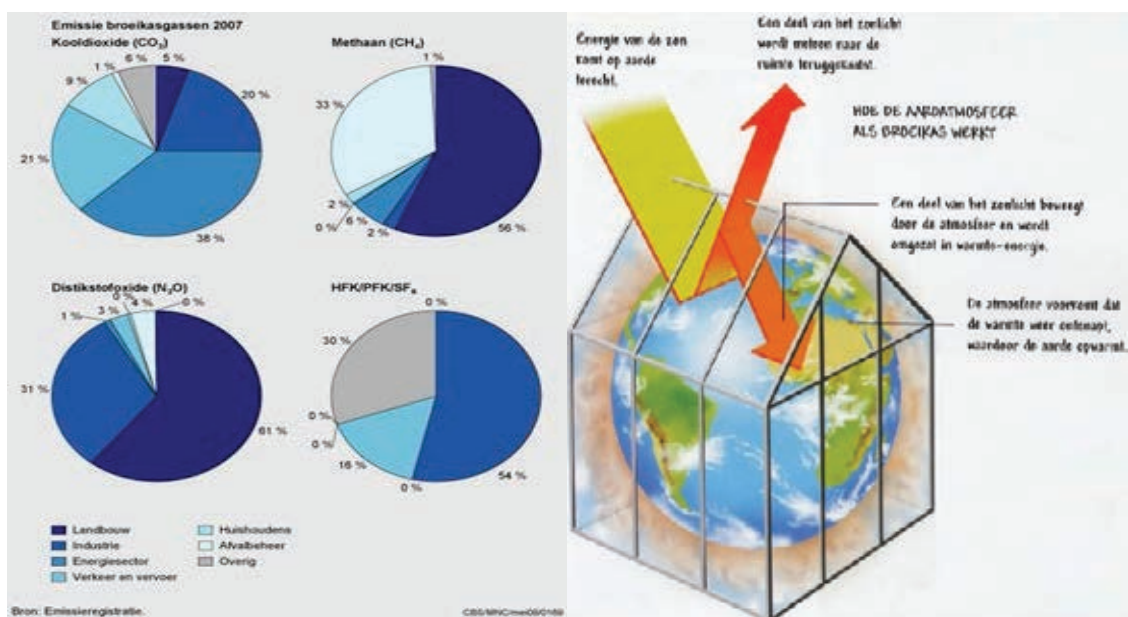
Aquamarijn has produced structured samples by hot embossing in polycarbonate, especially for the flexible PV-cells. Micropyramids are produced, serving as substrate material for the production of PV-cells.

1 Supertransparant kasdek materiaal (Wageningen UR Glastuinbouw)

1.1 Introductie

1.1.1 Aanleiding

In 2007 heeft het kabinet klimaatdoelstellingen voor het jaar 2020 vastgesteld: een vermindering van de emissie van broeikasgassen van 30% in CO₂-equivalenten ten opzichte van 1990 (Ministerie LNV, 2008). Met de agrarische sector is daarover het convenant Schone en Zuinige Agrosectoren afgesloten. Voor de glastuinbouw is hierin afgesproken dat er in het programma Kas als Energiebron gewerkt wordt aan het bewerkstelligen van een totale emissiereductie van 3,3 Mton CO₂ van de jaarlijkse emissie (waarvan de inzet van WKK 2,3 Mton realiseert), het verbeteren van de energie-efficiëntie met 2% per jaar en een aandeel van 20% duurzame energie in 2020. In Figuur 1. is het aandeel van de landbouw weergegeven in de totale emissie van broeikasgassen in Nederland. De ambitie in de glastuinbouw zoals gesteld in het programma Kas als Energiebron is dat vanaf 2020 de teelt in nieuwe kassen klimaatneutraal en economisch rendabel zal zijn (Programma Kas als Energiebron, 2011). Binnen het Programma zijn zeven prioritaire thema's aangegeven (transitiepaden): Teelstrategieën, Licht, Zonne-energie, Aardwarmte, Biobrandstoffen, Duurzame(re) elektriciteit, Duurzame(re) CO₂. Deze transitiepaden hebben als doel het bewerkstelligen van innovaties en optimalisaties per thema.



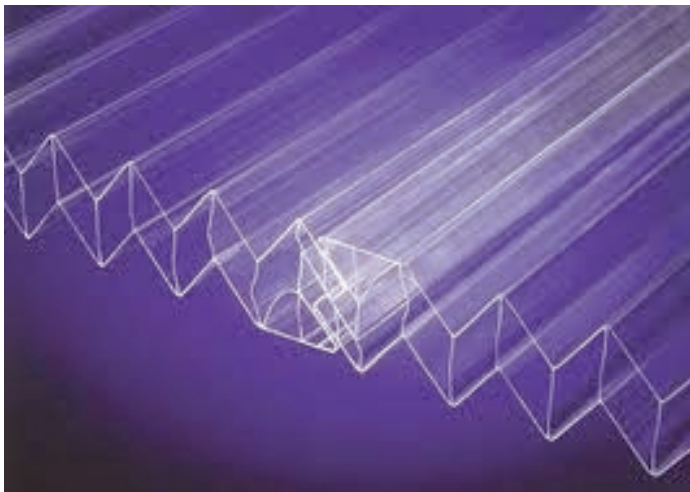
Figuur 1. Broeikasgassen in Nederland per industrie en de werking van het broeikaseffect op aarde (www.cbs.nl; www.klimaatwebsite.be).

Licht is de belangrijkste factor in de productie van gewassen, omdat de energiehuishouding van de plant gevoed wordt met energie uit de fotosynthese. Vuistregel is dat 1% meer licht in de kas zorgt voor ongeveer 1% meer gewasproductie (Cockshull, 1992; Marcelis, 2004). Het transitiepad Licht van het programma Kas als Energiebron is opgesplitst in twee richtingen: het efficiënter inzetten van kunstlicht en het efficiënter gebruiken van zonlicht. Bij het efficiënter inzetten van kunstlicht wordt veel verwacht van de toepassing van LED verlichting, door de mogelijkheid tot het sturen van het lichtspectrum en het plaatsen van de lampen tussen het gewas. Het efficiënter gebruiken van zonlicht kan bereikt worden door slimmer gebruik te maken van scherming en tijdelijke coatings en het toepassen van innovatief kasdek materiaal.

Het kasdek heeft een belangrijke invloed op het klimaat in de kas. Het kasdek zorgt ervoor dat de kas een 'gesloten' productiesysteem is, waardoor ongunstige factoren (zoals weersinvloeden en verspreiding van ziekten en plagen)

vermindert worden. Het kasdek materiaal heeft echter ook een effect op de gunstige productiefactor licht: afhankelijk van het materiaal en de vorm en de oriëntatie van de kas vermindert het kasdek de hoeveelheid licht (door het optreden van reflectie en absorptie) en verandert het eigenschappen van het licht (bijvoorbeeld spectrum en richting). Het verminderen van de reflectie en de absorptie zorgt voor een verhoging in de hoeveelheid licht beschikbaar voor plantengroei. Stappen worden gemaakt in de ontwikkeling van kasdek materiaal met een hoge hemisferische transmissie (anti-reflectie-coatings), diffuse uitstraling en hoge isolatiewaarde. Deze materialen zorgen voor een verhoogde productie als gevolg van meer licht in de kas (Hemming, 2006) en diffuus licht (Hemming, 2007a,b; Dueck, 2012), en een verlaging van het energiegebruik (Kempkes & Jansse, 2013 in press). Deze eigenschappen kunnen worden gecombineerd om tot een super transparant kasdek te komen met goede isolatie-eigenschappen.

In het verleden heeft Sonneveld (2001,2002) een materiaal ontwikkeld dat deze eigenschappen combineert: zigzag kasdek materiaal. Dit is een dubbelwandige kanaalplaat met zigzagvormige geometrie van polycarbonaat, te zien in Figuur 2. Dit materiaal heeft dezelfde hemisferische transmissie als enkel glas, maar heeft een veel hogere isolatiewaarde. Tijdens de uitvoering van dit project is gebleken dat hemisferische transmissie een betere maat voor de beoordeling van optische eigenschappen van kasdek materiaal dan de normaal gebruikelijke transmissie voor loodrecht invallende straling. Dat dit materiaal nauwelijks is toegepast heeft te maken met de lastig te implementeren vorm van het materiaal en het ontstaan van condens en daarmee algengroei tussen de lagen van het materiaal (Kempkes & Van Os, 2006). Hierdoor loopt de transmissie van het materiaal terug.



Figuur 2. Lexan zigzag kasdek materiaal (Kempkes & Van Os, 2006).

Een andere industrie waar het invangen van zoveel mogelijk licht van belang is, is de fotovoltaïsche industrie (opwekking elektrische energie via zonnepanelen, hierna te noemen PV-industrie). Reflectie op de afdekplaat van de zonnepanelen zorgt voor een verlaging van het rendement. De reflectie van de afdekplaat wordt in deze industrie verminderd door het toepassen van micro- en nanostructuren, die worden aangebracht op het oppervlak van de afdekplaat (Gombert, 1998a). Hierdoor wordt zoveel mogelijk licht het materiaal in geleid. Het laten groeien van het halfgeleidermateriaal op een gestructureerd oppervlak zorgt verder voor een diffuse inkoppeling van het licht het materiaal in, waardoor de padlengte van het licht in het materiaal groter wordt en de efficiëntie van de panelen verder wordt verbeterd (Dewan *et al.* 2009). Ook in de productie van beeldschermen worden nanostructuren toegepast om de reflectie van het scherm te verminderen (Kim *et al.* 2009).

Doelstelling

Doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is het gebruiken van micro- en nanostructuren uit de PV-industrie om te komen tot een diffuus kasdek materiaal met een hoge hemisferische transmissie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de kennis die in het verleden is opgedaan in het ontwikkelen van het zigzag kasdek materiaal. Met de ontwikkelde kennis kan energiebesparing gerealiseerd worden door het toepassen van de structuren op dubbel glas, waardoor materiaal gemaakt kan worden met een hoge hemisferische transmissie, diffuse eigenschappen en een hoge isolatiewaarde. Randvoorwaarde hierin is dat het ontwikkelde kasdek materiaal toepasbaar is in een glastuinbouwmilieu. Dit betekent dat het materiaal niet

mag verouderen, condensatie de transmissie niet mag verminderen en extra vervuiling niet mag optreden. Hierbij wordt de Nederlandse situatie als uitgangspunt genomen, maar interessante structuren voor andere klimaten zullen niet worden uitgesloten.

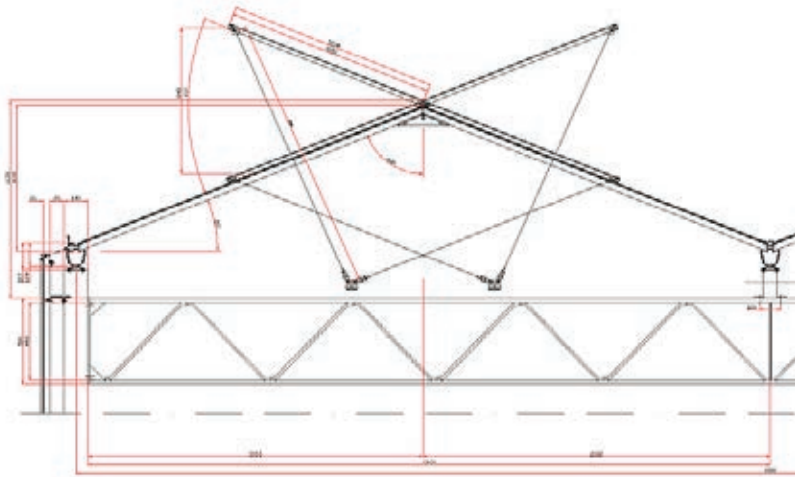
Aanpak

Er is gestart met het uitvoeren van een literatuurstudie naar de optische kenmerken van bekende micro- en nanostructuren uit de PV-industrie. In samenwerking met deze literatuurstudie is met behulp van software-simulaties onderzocht welke configuratie van micro- en nanostructuren zorgt voor de optimale hemisferische transmissie. In deze simulaties is een optimalisatie naar de hemisferische transmissie uitgevoerd. Een aantal configuraties van nanostructuren is geselecteerd voor verder onderzoek, op basis van theoretische verhoging in de hemisferische transmissie. Parallel is onderzocht welke methode het meest geschikt is om micro- en nanostructuren aan te brengen op kasdekmateriaal. Op labschaal zijn met de best beschikbare methode samples gemaakt van deze configuraties, waarmee metingen zijn uitgevoerd naar de hemisferische transmissie en de lichtspreiding (maat voor diffusiteit) van de materialen in de praktijk. Daarnaast zijn metingen uitgevoerd naar niet-optische eigenschappen van de ontwikkelde materialen, vermogen tot zelfreiniging en het effect op de isolatiewaarde. Dit om te onderzoeken of de materialen geschikt zijn voor gebruik in de glastuinbouw. Ook is een business case opgesteld om het effect van de materialen op de bedrijfsvoering te onderzoeken. Het niet-technisch onderzoek aan kasdekmateriaal met micro-V of nano-structuren omvat twee onderdelen: de economische haalbaarheid en de sociaalwetenschappelijke aspecten. Doel van het niet-technische onderzoek is enerzijds de economische haalbaarheid van nieuwe structuren van kasdekken voor de glastuinbouw in kaart te brengen en anderzijds deze innovaties te bekijken vanuit een sociaalwetenschappelijk oogpunt en in het licht van relevante ontwikkelingen en tendensen binnen en buiten de glastuinbouw. De resultaten uit en de vorderingen in het technisch onderzoek aan micro-V of nano-structuren zijn van invloed geweest op de uitvoeringswijze van het niet-technische onderzoek.

1.2 Literatuurstudie

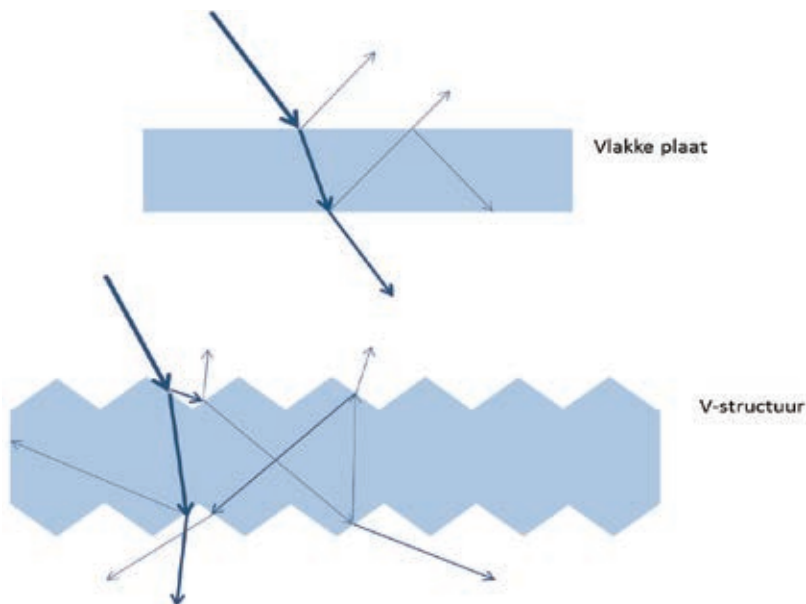
Het kasdek wordt gebruikt om gewas af te schermen van omgeving en daarmee een gecontroleerd klimaat te kunnen genereren. De belangrijkste productiefactor (licht) moet hierdoor het kasdek passeren voordat het gewas bereikt wordt. Het kasdek vormt een overgang in brekingsindex in de baan van het licht, waardoor reflectie van het licht op het oppervlak optreedt. Dit betekent een verlies in de hoeveelheid licht die het gewas bereikt, de transmissie. De transmissie is het licht dat overblijft na reflectie op het oppervlak en absorptie door moleculen in de bulk van het materiaal. Minimalisatie van absorptie en reflectie zorgt voor een maximalisatie in transmissie. De absorptie wordt verminderd door het aantal moleculen dat het licht tegenkomt te verminderen: door het materiaal dunner te maken, of door hoog-absorberende moleculen te verwijderen (ijzer-arm glas) (Goodyear & Lindberg, 1980).

De verliezen in reflectie kunnen worden verminderd door een goed ontwerp van de kas. De vorm van het kasdek kan zo worden ontworpen dat de gereflecteerde lichtstraal op de ene kap weer wordt ingevangen door de volgende kap. Het kasdek zoals nu veelal gebruikt wordt, heeft een elevatie (hoek t.o.v. horizontaal) van 22°-25° in een V-structuur, wat een optimum is in de balans tussen het weer invangen van de gereflecteerde stralen en het extra gebruik van constructiemateriaal (is extra verlies door reflectie). Stoffers (1968) heeft met behulp van geometrische optica berekend dat bij een toename van de elevatie van het kasdek (Figuur 3.) meer licht wordt teruggewonnen door het weer opvangen van de gereflecteerde straal op de volgende kap (zie Figuur 4.). Echter, hoe groter de elevatie, hoe meer constructiemateriaal er nodig is om het dak te ondersteunen, waardoor de totale transmissie weer verlaagd wordt. Een helling van 22°-25° wordt als optimaal beschouwd voor de lichttransmissie.



Figuur 3. Het verhogen van de kasdekhelling heeft een toename in de hoeveelheid materiaal tot gevolg (<http://www.hortitrade.com>).

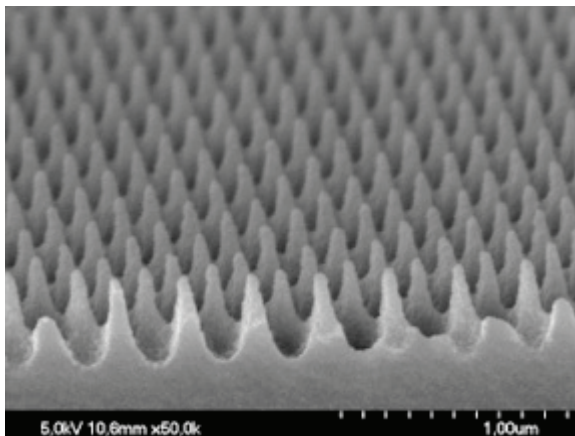
Het invangen van de gereflecteerde lichtstraal is ook toegepast in de ontwikkeling van het zigzag-kasdek, een dubbele kanaalplaat in een V-structuur. Dit materiaal heeft een hoge isolatiewaarde en toch een hemisferische transmissie gelijk aan helder enkel glas (Sonneveld 2001;2002). Er waren echter teveel praktische bezwaren voor grootschalige implementatie van dit materiaal (Kempkes & Van Os, 2006). Met name condensatie tussen de platen van het dubbelzijdige materiaal zorgde voor een in de praktijk lagere hemisferische transmissie dan gewenst. Het kleiner maken van deze structuren zou ervoor moeten zorgen dat de praktische bezwaren kunnen worden overwonnen, terwijl de optische voordelen behouden blijven. De werking van het principe van het weer opvangen van de eerste gereflecteerde straal is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Verhoging transmissie door microstructuren. In de V-structuur wordt de gereflecteerde straal weer opgevangen en deels het materiaal ingeleid.

De wetten van de geometrische optica (waarop het zigzag-materiaal is gebaseerd) blijven geldig zolang de structuren veel groter zijn dan de golflengte van het licht, minimaal ongeveer 5-10 μ m. Zoals in Figuur 4. te zien is, hebben deze structuren ook een effect op de richting van het licht aan de onderzijde van het materiaal.

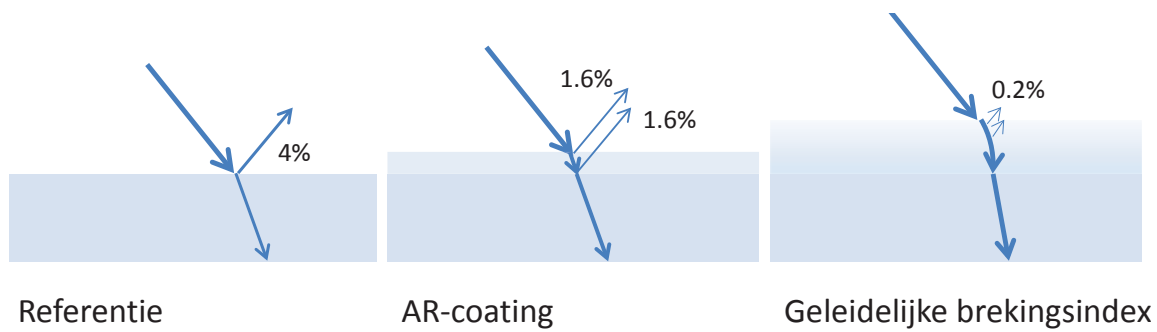
In andere industrieën dan de glastuinbouw wordt ook gebruik gemaakt van microstructuren om licht te kunnen managen. In dunne film zonnepanelen moet een manier gevonden worden om het licht in de actieve laag van de zonnecel te houden. Hiervoor worden bijvoorbeeld micropiramides gebruikt, die het licht bij binnenkomst diffuus de cel in brengen. Hierdoor wordt de padlengte van het licht in het materiaal groter en wordt de kans groter dat een foton wordt omgezet in elektrische energie. De achterwand van de zonnecel kan ook gestructureerd worden, waardoor deze reflectie ook diffuus weer terug het materiaal in wordt gebracht (De Jong, 2013; Escarré *et al.* 2011). De afmetingen van deze structuren kunnen variëren van microstructuren (waarbij diffuse reflectie of transmissie optreedt op basis van brekingsindex) tot nanostructuren (afmetingen ongeveer even groot als golflengte van zichtbaar licht, hierbij treedt diffusie door diffractie op). Dubbelzijdige toepassing van nanostructuren combineert anti-reflectie eigenschappen met verbeterde absorptie-eigenschappen in PV-cellen (Wang *et al.* 2012). Afhankelijk van de golflengte van het licht treedt bij afmetingen van structuren tussen 10µm en 300nm diffractie of refractie op. Één van de structuren die hiervoor gebruikt wordt is de microlens (Chen *et al.* 2013). Deze structuren kunnen voor de glastuinbouw ook interessant zijn om het licht diffuus te maken.



Figuur 5. De nanostructuur op het oppervlak van een mottenoog zorgt voor een anti-reflectie werking. (Bron www.nanoptics.de).

Als de structuren kleiner dan 250nm gemaakt kunnen worden, dan treedt geen diffractie meer op. De structuren zijn nu kleiner dan de golflengte van het licht (subwavelength structures, SWS). Het licht 'ziet' als het ware de structuren niet meer, maar ervaart een geleidelijke overgang van de brekingsindex van lucht naar de brekingsindex van het materiaal (o.a. Lalanne & Hutley, 2003; Yeo *et al.* 2012). Dichter naar het materiaal toe zal de lucht steeds meer gevuld worden met materiaal, waardoor de optische dichtheid (en dus de brekingsindex) langzaam toeneemt. Hierdoor wordt de lichtstraal langzaam afgebogen en zal er weinig reflectie optreden. Een voorbeeld van zo'n structuur is de moth-eye structuur (Figuur 5.). Deze structuren zorgen echter niet voor een diffusering van het licht.

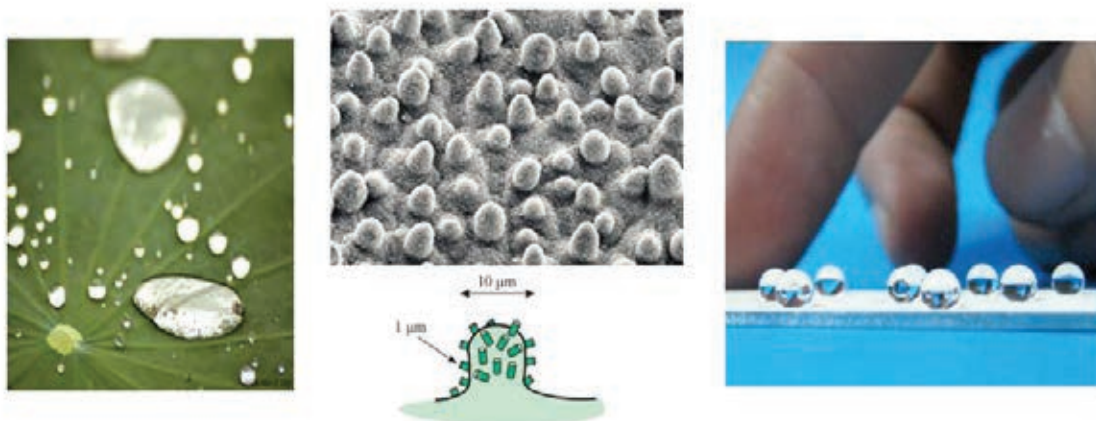
In Figuur 6. is het verschil weergegeven tussen een referentiemateriaal, een materiaal met een antireflectie coating en een materiaal met een geleidelijke overgang in brekingsindex. Bij een referentiemateriaal vindt de overgang in brekingsindex direct plaats, waardoor een Fresnel-reflectie optreedt van 4%. Wanneer een anti-reflectie (AR) coating op het materiaal wordt aangebracht met een brekingsindex tussen die van lucht en het materiaal in, dan zullen er twee, maar in totaal een kleinere reflectie optreden. Wanneer de brekingsindex echter geleidelijk overgaat van lucht naar materiaal, dan treedt er nauwelijks reflectie op het oppervlak op.



Figuur 6. Verschil in reflectie tussen referentiemateriaal, AR-coating en geleidelijke overgang in brekingsindex.

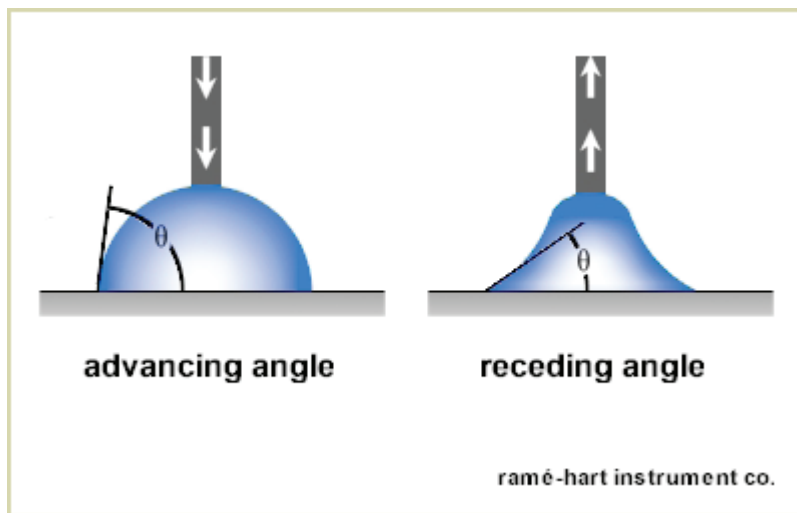
Bovenstaande principes kunnen worden toegepast om de transmissie van kasdekmateriaal te verbeteren en tegelijkertijd een diffuse uitworp van het licht te creëren. Microstructuren of nanostructuren zijn nodig om het licht diffuus te maken (d.m.v. refractie en diffractie). Wanneer microstructuren zo gekozen worden dat ze ook het gereflecteerde licht weer invangen (zie Figuur 4.), dan kan tegelijkertijd met het diffuus maken van het licht een verbetering in transmissie worden bereikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat voor de glastuinbouw het licht niet moet worden geabsorbeerd door het materiaal (zoals in de PV-industrie), maar dat het uitgestraalde licht optimaal moet worden benut door het gewas. De gevraagde functionaliteit is in beide industrieën verschillend, dus zullen de structuren moeten worden aangepast om tot een optimale structuurvorm voor de glastuinbouw te komen.

Micro- en nanostructuren op het oppervlak van een transparant materiaal veranderen niet alleen de optische eigenschappen. Ook gedrag van het oppervlak ten aanzien van bijvoorbeeld water kan veranderen. Bij een lotus-plant zorgen een combinatie van micro- en nanostructuren samen met de oppervlakchemie van het blad voor een superhydrofoob oppervlak, waardoor waterdruppels direct van het oppervlak afrollen (Liu & Jiang, 2012; Figuur 7.). Een zelfreinigend effect treedt op doordat de rollende waterdruppels alle vuildeeltjes van het oppervlak meenemen. Voor kasdekmateriaal kan dit effect ervoor zorgen dat er minder vaak schoongemaakt hoeft te worden.



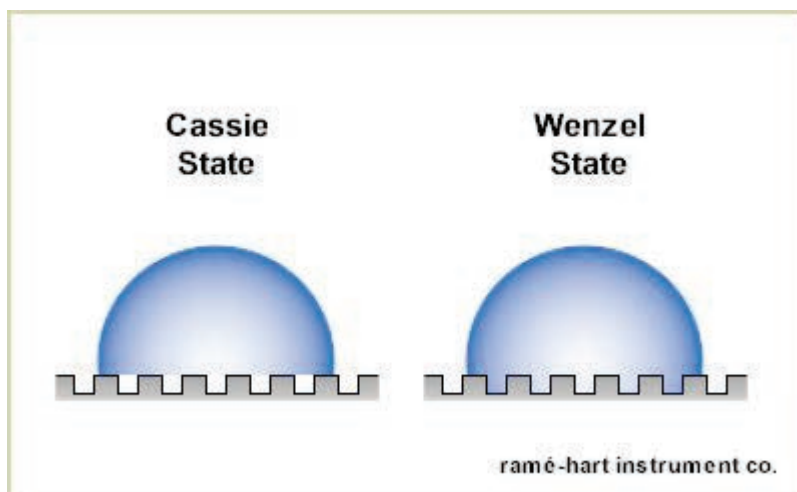
Figuur 7. Lotus effect, waterdruppels maken het oppervlak niet nat, maar rollen er overheen (bron www.wageningenur.nl).

De hydrofobiciteit (mate van waterafstotendheid) van een materiaal wordt uitgedrukt in de contacthoek die een waterdruppel maakt met het oppervlak (zie Figuur 8.). Een grote contacthoek is een kenmerk van een hydrofoob materiaal, een kleine contacthoek een kenmerk van een hydrofiel materiaal. Een methode om dit te meten is het vergroten en verkleinen van het volume van een druppel op een oppervlak, zonder het contactoppervlak tussen de druppel en het oppervlak te vergroten of te verkleinen. Op het punt waar bij vergroting van het volume van de druppel het contactoppervlak nog precies gelijk blijft kan de advancing contacthoek gemeten worden. Bij verkleining van het volume kan de receding contacthoek gemeten worden. Het verschil tussen deze twee hoeken is de contacthoekhysterese en is ook een maat voor hydrofobiciteit.



Figuur 8. Bepaling van de hydrofobiciteit van een materiaal door middel van de contacthoek van een waterdruppel met het materiaaloppervlak (www.ramehart.com).

Het aanbrengen van microstructuren op het oppervlak van een materiaal is van invloed op de hydrofobiciteit van een materiaal. Afhankelijk van de afmeting kan een microstructuur het oppervlak dat in contact staat met de waterdruppel vergroten of verkleinen. Bij grote microstructuren dringt het water door in de microstructuur, waardoor het oppervlak van het materiaal volledig zal worden natgemaakt. Bij kleinere structuren kan de waterdruppel bovenop de structuren blijven liggen, waardoor er luchtbellens onder de waterdruppel in de structuur zullen blijven. Het contactoppervlak tussen de waterdruppels en het materiaal wordt hierdoor kleiner. Het compleet vullen van de microstructuur volgt de wetmatigheden van Wenzel, terwijl het opsluiten van luchtbellens de regels van Cassie-Baxter volgen (zie Figuur 9, Bhushan & Jung, 2011). Als een materiaal intrinsiek hydrofoob is, dan zal een microstructuur de hydrofobiciteit vergroten, als een materiaal intrinsiek hydrofiel is, dan zal een microstructuur dit ook versterken.



Figuur 9. De verschillende staten waarin een waterdruppel met een microstructuur kan voorkomen (www.ramehart.com).

Wanneer een microstructuur wordt aangebracht zonder daarin nanostructuren aan te brengen, zal volgens Wenzel bij hydrofobe materialen een hoge contacthoek optreden en mogelijk een hoge contacthoekhysterese, terwijl volgens Cassie een hoge contacthoek en een lage contacthoekhysterese optreedt. Hierin zit een verschil in hoeverre zelfreiniging van het materiaal kan optreden. Wanneer in de Cassie state een zeer hoge contacthoek optreedt, dan zal de druppel bij een kleine helling van het oppervlak vanzelf van het materiaal afrollen, terwijl dit in de Wenzel state niet het geval is, doordat de microstructuur de waterdruppel vasthoudt. Hierdoor kan een materiaal hydrofoob zijn, maar toch geen zelfreiniging tot gevolg hebben. Een soortgelijk verschil treedt op tussen het blad van een lotusplant en het blad van een roos (Bhushan &

Nosonovsky, 2010). Beide oppervlakken zijn superhydrofoob, maar terwijl op het blad van een lotusplant waterdruppels van het materiaal afrollen (Cassie state), blijft op het blad van een roos een waterdruppel vastplakken (Wenzel state).

De micro- en nanostructuren hebben ook een effect op de condensatie van water op het oppervlak (Bico *et al.* 1999; Zhong *et al.* 2006). Het gedrag van condens op het oppervlak van het kasdek materiaal kan een belangrijke invloed hebben op de hoeveelheid licht die door het jaar heen de kas in komt, door een toegenomen reflectie (druppelvorming) of een toegenomen transmissie (filmvorming) (Stanghellini *et al.* 2010). Dit hangt samen met de hydrofobiciteit van het materiaal, zoals hierboven besproken.

Tenslotte kan er nog een effect van microstructuren bestaan op de isolatiewaarde van het materiaal door een toegenomen (of afgenomen) transmissie voor warmtestraling. De microstructuren hebben ook effect op de convectieve warmteoverdracht, zoals is aangetoond in koperplaten (Augustin *et al.* 2007).

1.3 Materiaal en methode

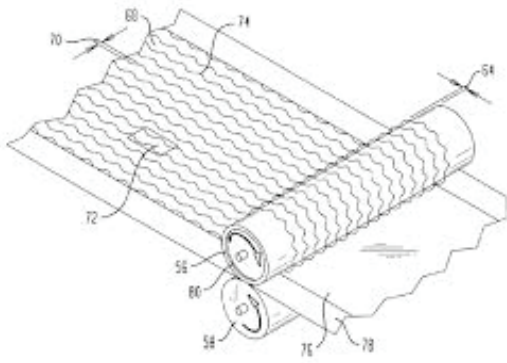
1.3.1 Methoden voor aanbrengen van structuren

1.3.1.1 Randvoorwaarden

De glastuinbouw is een industrie die op oppervlakten van meerdere hectaren per bedrijf agrarische producten produceert. Hierdoor is het noodzakelijk dat de microstructuren op grote schaal kunnen worden aangebracht op het kasdek materiaal. Daarnaast moeten de kosten laag zijn vanwege de kleine marges op de inkomsten. De regelmatige microstructuren die onderzocht worden, moeten scherp aangebracht worden in het materiaal, omdat anders het effect verloren gaat. Dit betekent ook dat de structuren vormvast moeten zijn in de situatie waarin ze geplaatst worden, omdat anders in de loop van de tijd het effect vermindert.

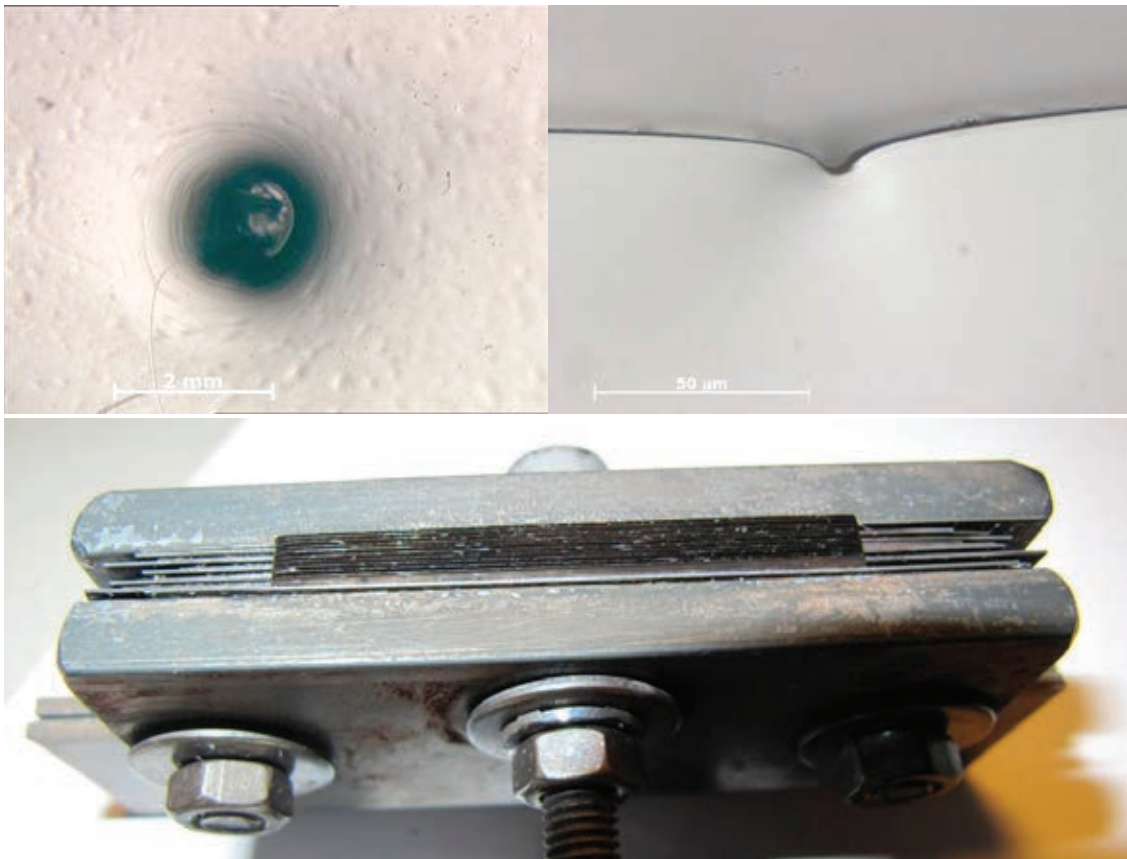
1.3.1.2 Warm embossen

Bij embossen wordt de structuur in het dragermateriaal gedrukt. De meest energie-efficiënte manier om dit te doen is direct in het productieproces met een wals over de volledige breedte van de glasplaat, omdat het glas dan nog warm en vervormbaar is (Figuur 10.). Het floatglas dat in de glastuinbouw gebruikt wordt, wordt gemaakt op een bad van vloeibaar tin, zodat het extreem vlak is. Doordat het vloeibare glas op vloeibaar tin drijft en aan de zijkanten niet zit ingesloten door een mal, zal het vloeibare glas onder druk van een wals uitvloeien naar de zijkant van de wals en de structuur niet (scherp) overnemen. Een oude methode om vlakglas te maken maakte gebruik van een wals. Deze methode wordt echter niet meer gebruikt voor grootschalige productie, waardoor het niet meer mogelijk is om het glas in het productieproces te structureren.



Figuur 10. Walsen van een structuur in een oppervlak (Schmidt et al. 2005).

Wanneer de glasplaat opnieuw wordt opgewarmd in een mal wordt het wel mogelijk om een structuur aan te brengen door embossen. Bij het gebruiken van zachtglas is er relatief weinig warmte nodig om de glasplaat vervormbaar te maken, omdat de glastemperatuur laag is. Echter, het glas is weinig vormvast, zoals pogingen binnen dit project hebben uitgewezen (Figuur 11.). Wanneer het stempelmateriaal de zachte glasplaat loslaat, vloeit het weer zo uit dat de structuur niet scherp in het oppervlak is aangebracht.

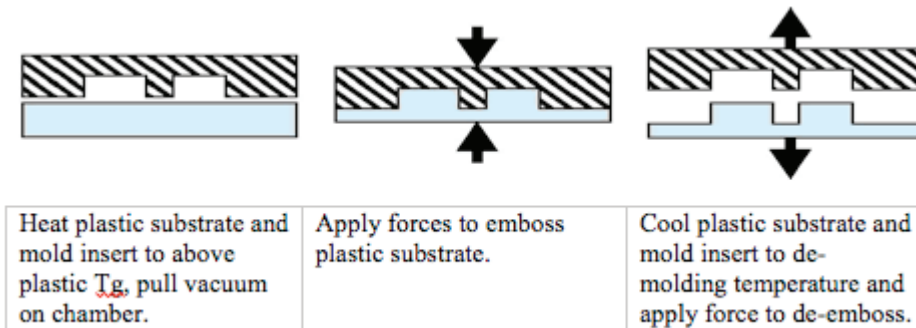


Figuur 11. Aangebrachte structuren in warm glas, waarbij duidelijk zichtbaar is dat het vloeibare materiaal terugstroomt in de structuur. Onderste Figuur laat het stempel zien waarmee meerdere lijntjes tegelijkertijd zijn aangebracht (bron H.Galenkamp, Pulles & Hanique).

Zachtglas heeft ook als nadeel dat er veel ijzeroxide in het materiaal zit, waardoor veel infraroodstraling wordt geabsorbeerd. Hierdoor is het glas minder geschikt voor toepassing in de glastuinbouw in Nederland. Borosilicaatglas heeft dit nadeel niet, maar heeft een veel hogere bewerkingstemperatuur. Het kost daarom veel energie om de glasplaat opnieuw op te warmen en brengt behoorlijke kosten met zich mee (bij een glasplaat van 1m² en 5mm dik kost het 16kWh en dus €3,20/m²). Bovendien is ook het stempelmateriaal slecht bestand tegen de hoge verwerkingstemperatuur. Dit productieproces

is daarom niet geschikt om glas te structureren. Het aanbrengen van structuren in het glas heeft een effect op de sterkte van het glas (Bijlage I).

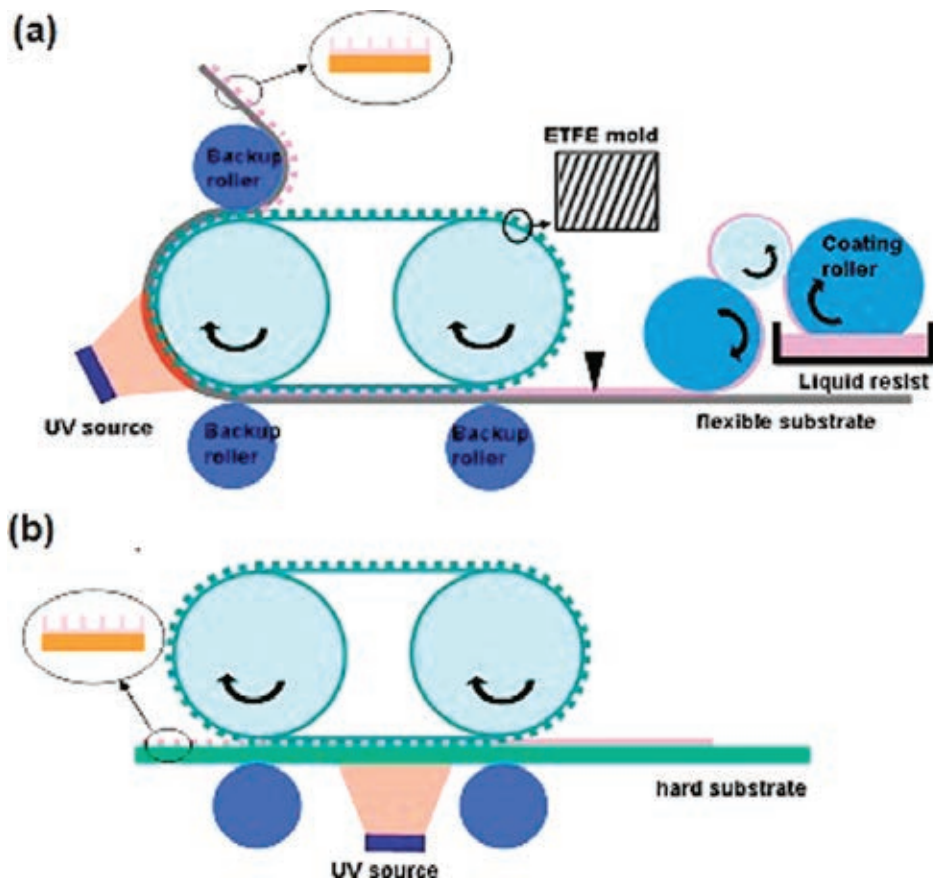
Plastic folies (PVC, PC, etc.) hebben een lage glastemperatuur en kunnen aan het eind van het productieproces worden voorzien van een structuur door middel van embossen (Heckeles *et al.* 1998). Deze techniek is niet verder onderzocht, omdat de Nederlandse tuinbouw geen plastic folies gebruikt als kasdek materiaal. Het proces is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12. Embossen van een structuur in plastic folie (bron www.memsnet.org).

1.3.1.3 Embossen in laklaag

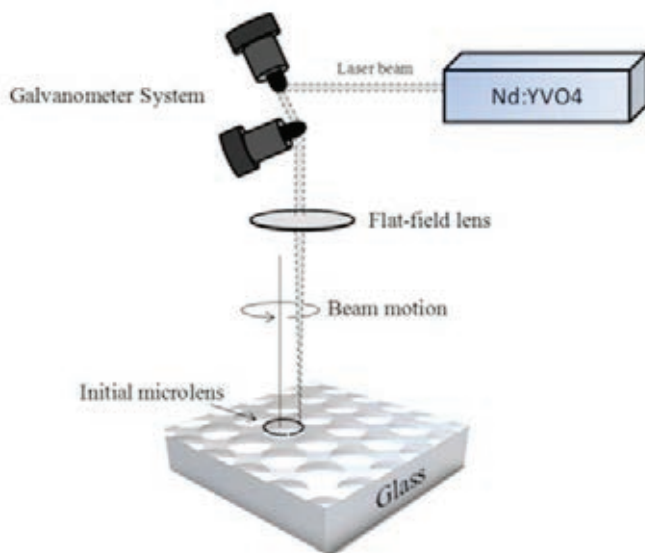
De bovengenoemde problemen kunnen worden ondervangen door een laklaag aan te brengen op het oppervlak van het substraatmateriaal (glas of plastic). Na het afkoelen van de glasplaat in het productieproces wordt een laagje van een UV-uithardende lak aangebracht op het oppervlak van de glasplaat (Figuur 13.). Deze laklaag wordt vervormd door een gestructureerde wals, waar de lak weer goed van loskomt wanneer het wordt uitgehard met UV-licht. De gestructureerde wals kan hierdoor vaak gebruikt worden zonder dat er grote slijtage van de structuren optreedt. De te gebruiken UV-uithardende lak moet transparant zijn, moet beter hechten aan het glas dan aan de wals en moet vormvast zijn of een voorspelbare krimp hebben bij het uitharden.



Figuur 13. Embossen van UV-uithardende laklaag op glas (Ahn *et al.* 2009).

1.3.1.4 Laserbewerken

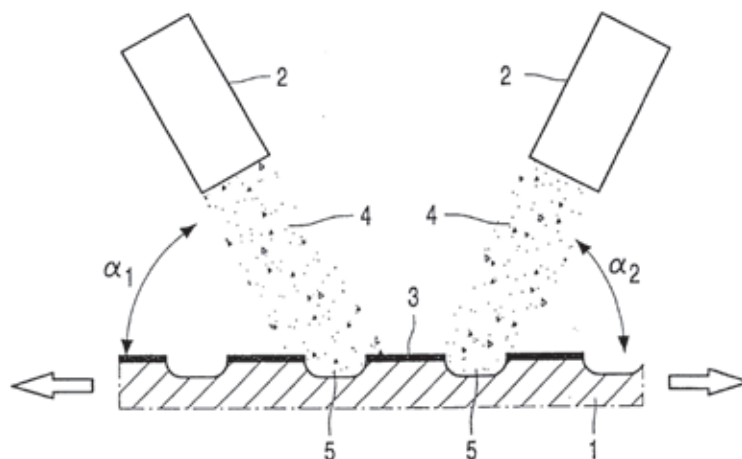
Laserbewerken wordt toegepast in de micro-elektronica om micro- en nanostructuren aan te brengen op bijvoorbeeld chips. Ook kunnen microlenzen worden aangebracht op glas (Nieto *et al.* 2011). De laserstraal wordt gebruikt om een deel van het materiaaloppervlak weg te branden (zie Figuur 14.). Voor de glastuinbouw markt niet geschikt vanwege de hoge kostprijs en de moeilijkheid om op te schalen tot productie van uiteindelijk vierkante kilometers.



Figuur 14. Een laserstraal wordt gebruikt om een deel van het materiaaloppervlak weg te branden (Niето et al. 2012).

1.3.1.5 Bestralen met micropoeder

In plaats van een laserstraal kan ook een micropoeder gebruikt worden om het oppervlak van glas te structureren. Een masker wordt aangebracht op het oppervlak, waarna met een poeder van microdeeltjes het oppervlak bestraalt wordt (Figuur 15.). De open delen van het masker worden weggeblazen door de mechanische impact van de microdeeltjes (Belloy *et al.* 2000). Dit levert scherp gedefinieerde microstructuren op, maar de oppervlakken van de structuren zijn in het geval van het bestralen met een micropoeder ruw, waardoor een relatief hoge reflectie optreedt. Hierdoor zal de transmissie niet toenemen door het aanbrengen van microstructuren, waardoor deze methode niet geschikt is voor het verhogen van de hemisferische transmissie van kasdekmateriaal.

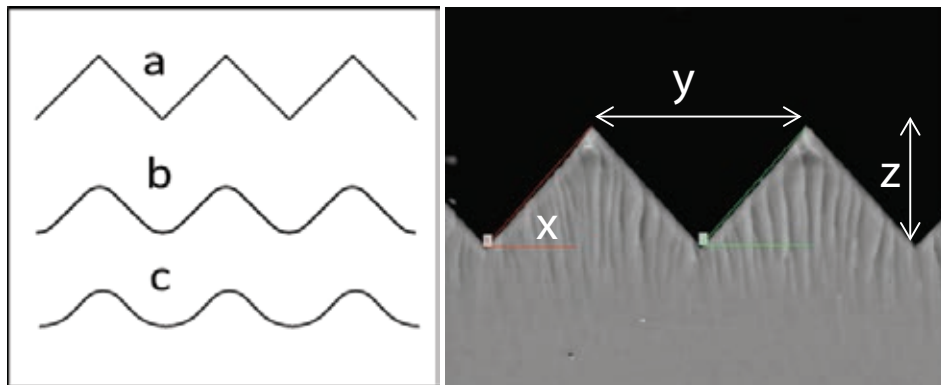


Figuur 15. Bestralen van het glasoppervlak met een micropoeder levert scherpe microstructuren op, maar door het diffuse karakter van de structuren gaat het gewenste effect verloren (Bron Patent US6422920).

1.3.2 Productiemethode testsamples

Als productiemethode voor de te onderzoeken samples is gekozen voor het walsen van de structuren in een Uv-uithardende lak op een substraatmateriaal. Deze methode brengt de micro- en/of nanostructuren scherp aan op het materiaal, wat

belangrijk is voor een goede werking (zie Figuur 16.). Ondanks dat de Nederlandse tuinbouw voor het grootste gedeelte bestaat uit kassen met een glazen dek, is bij de testsamples gekozen voor polyethyleentereftalaat (PET) en polycarbonaat (PC) als dragermateriaal. De methode is goed opschaalbaar, zodat er grote oppervlakken gemaakt kunnen worden bij toepassing van het ontwikkelde materiaal in de praktijk. Voor de Nederlandse glastuinbouw is het belangrijk dat deze methode goed inpasbaar is achter het productieproces van floatglas, waardoor de extra kosten voor het structureren relatief laag blijven. Het eindproduct heeft potentieel goede eigenschappen op het gebied van mechanische belasting van de structuren, vervuiling en levensduur.



Figuur 16. Scherpte van de microstructuur (micro-V); $a = 100\%$ scherp, $b = 5\%$ afronding, $c = 20\%$ afronding; $x =$ microhoek, $y =$ pitch, $z =$ hoogte.

In de eerste fase van het productieproces wordt een master van nikkel gemaakt met de gewenste structuur (Boerner *et al.* 2003). Deze master wordt gebruikt om een transparante film (PDMS) te maken met de gewenste structuur in spiegelbeeld. De transparante film loopt over een metalen wals, die op het oppervlak van een glasplaat drukt. Vlak voor de wals wordt op de vlakke glasplaat een dunne, vloeibare laklaag aangebracht. De vloeibare lak wordt met de transparante film over de wals in de gewenste vorm gedrukt. UV-licht wordt gebruikt om de lak te laten uitharden en daardoor van de transparante film te laten lossen. Hiervoor moet de lak beter hechten aan de glasplaat dan aan de transparante film. Doordat de gestructureerde lak al uitgehard is op het moment dat het loskomt van de transparante film, staat de structuur scherp in het materiaal gedrukt (zie Figuur 16.). De microstructuur maakt een hoek (x) met het oppervlak van het materiaal, heeft een afmeting (pitch, y) en een hoogte (z).

Het eindproduct moet een goede levensduur hebben en bestand zijn tegen de omstandigheden in de kas. Hiervoor mag de lak niet verouderen of verkleuren onder invloed van UV-licht, mag niet reageren met chemicaliën die in de kas gebruikt worden, moet bestand zijn tegen vocht (condens aan de binnenkant en regen aan de buitenkant) en mechanische belasting. Optisch moet de lak een goede spectrale en totale transmissie hebben, wat afhankelijk is van de brekingsindex en de chemische samenstelling van de lak. De lak moet ook geen eigenschappen hebben die een sterkere mate van vervuiling van het kasdek veroorzaken, zodat de transmissie gedurende gebruik hoog blijft. In eerste instantie is het doel van dit onderzoek om structuren te vinden die de transmissie van kasdek materiaal verhogen en ook verder goede eigenschappen hebben, in tweede instantie zal pas gekeken worden naar de levensduur van de gebruikte lak.

Voor de metingen die binnen dit project zijn uitgevoerd om de werking van de structuren aan te tonen, zijn samples op labschaal gemaakt. De afmeting van de samples wordt bepaald door de afmetingen van de masters, maar moet groot genoeg zijn om metingen mee uit te kunnen voeren. De meting moet bij een hoek van inval van 70° uitgevoerd kunnen worden zonder dat er licht via de zijkant van het sample de monsterpoort inkomt en zonder dat er licht wat boven de monsterpoort invalt via de zijkant het sample verlaat. Daarvoor moet het sample een stuk groter zijn dan de monsterpoort, of het sample moet zo dun zijn dat er geen licht binnenkomt via de zijkant van het sample.

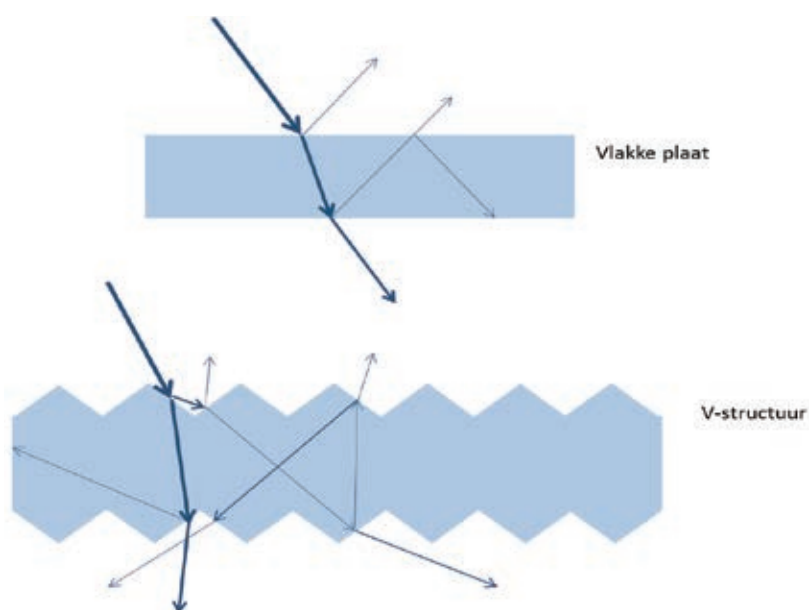
1.3.3 Modelsimulaties

Simulaties met optische modellen zijn uitgevoerd naar de werking van een aantal vormen van micro- en nanostructuren. Dit geeft de mogelijkheid te voorspellen hoe de vorm en de maatvoering van de structuren invloed hebben op de diffusiteit en de lichttransmissie. Het aantal samples dat daadwerkelijk moet worden doorgemeten, wordt zo beperkt tot precies het nodige om toch goede uitspraken te kunnen doen.

1.3.3.1 Microstructuren

Structuren op microschaal hebben afmetingen vanaf ongeveer $5\mu\text{m}$ en groter. De afmetingen van deze structuren zijn veel groter dan de golflengten van zichtbaar licht. Structuren met deze afmeting volgen de wetten van de klassieke optica, waarin reflectie en transmissie optreden afhankelijk van de brekingsindex van het materiaal. Als we een direct invallende lichtstraal beschouwen, dan kan in principe bij elke overgang tussen lucht en substraat de invallende lichtstraal opbreken in een gereflecteerde en een doorgelaten straal. Vele van deze stralen zijn zelf weer invallend op een ander deel van de structuur. Zo ontstaat al gauw een wirwar van stralen, met quasi willekeurige richtingen. Het overall effect hiervan is zowel een diffuse reflectie als een diffuse transmissie.

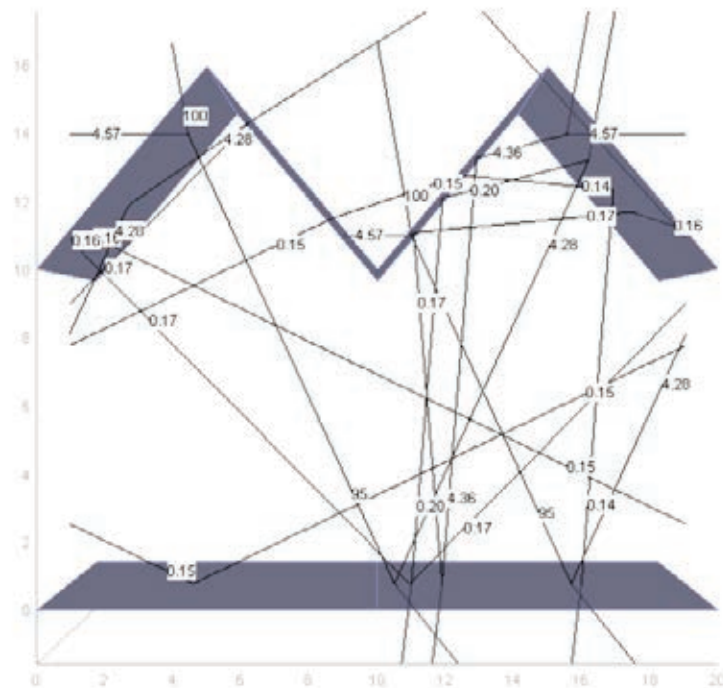
In tegenstelling tot volkomen willekeurige structuren (coatings, gezandstraald glas, diffuus glas) kunnen regelmatige microstructuren (micro V-groef, piramiden) gebruikt worden om het binnenkomende licht in bepaalde richtingen te sturen, afhankelijk van de richting van het inkomende licht en de vorm van de structuur. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om de diffusie te sturen. Daarnaast kan met deze structuren een deel van de gereflecteerde straling omgezet worden in transmissie, door het weer opvangen van de eerste gereflecteerde lichtstraal in de volgende herhaling van het microstructuur patroon. Dit is weergegeven in Figuur 17. Op een vlakke plaat treedt reflectie op twee oppervlakken op: bij de overgang van lucht naar glas en bij de overgang van glas naar lucht. Door een microstructuur aan te brengen op het materiaal, wordt de lichtstraal door de structuur in een andere richting gereflecteerd dan bij het vlakke materiaal. Hierdoor gaat de lichtstraal niet verloren, maar wordt weer opgevangen in de volgende structuur, waar weer een deel het materiaal ingaat en een deel alsnog gereflecteerd wordt. Ook is te zien dat het licht dat het materiaal aan de onderzijde als transmissie verlaat diffuus is, met bepaalde voorkeursrichtingen die worden bepaald door de vorm van de aangebrachte structuur.



Figuur 17. Verhoging transmissie door microstructuren. In de V-structuur wordt de gereflecteerde straal weer opgevangen en deels het materiaal ingeleid.

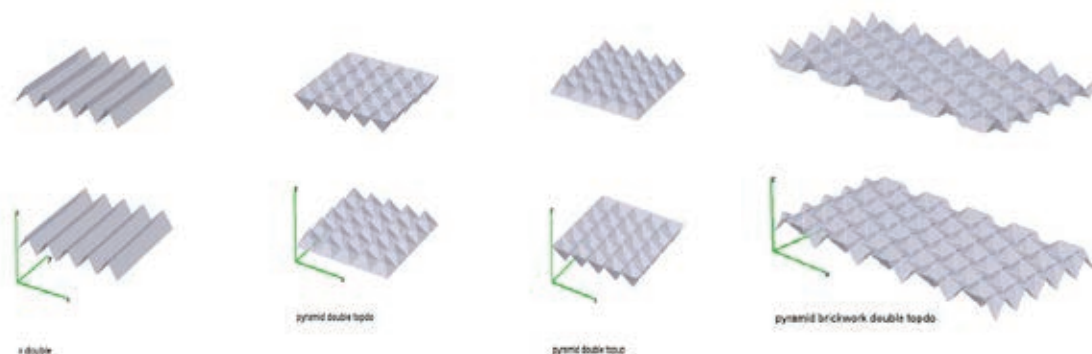
Ray tracing modelsoftware (Spencer & Murty, 1962) maakt gebruik van de wetten van de klassieke optica om lichtstralen te volgen. Deze software is gebruikt om het effect van microstructuren op de transmissie van transparant materiaal te

kunnen berekenen. De microstructuren worden gesimuleerd alsof ze oneindig repeterend zijn, waardoor randeffecten wegvallen en het effect van de structuur op de transmissie goed duidelijk wordt (zie Figuur 18.). Een lichtstraal die aan de linkerkant van de simulatie het beeld verlaat komt aan de rechterkant weer binnen. De formules van Fresnel worden gebruikt om te bepalen in welke richting de lichtstralen afbuigen bij een overgang in brekingsindex en wat hun intensiteit is. Er wordt diffuus opvallend licht met een golflengte van 590nm gesimuleerd, waarmee de hemisferische transmissie en de reflectie kunnen worden berekend. Absorptie van het materiaal wordt buiten beschouwing gelaten, omdat de verwachting is dat de structuren hier geen effect op hebben.



Figuur 18. Ray-tracing software waarin een oneindig repeterende structuur is nagebootst door de lichtstralen van de ene kant naar de andere kant te laten verspringen.

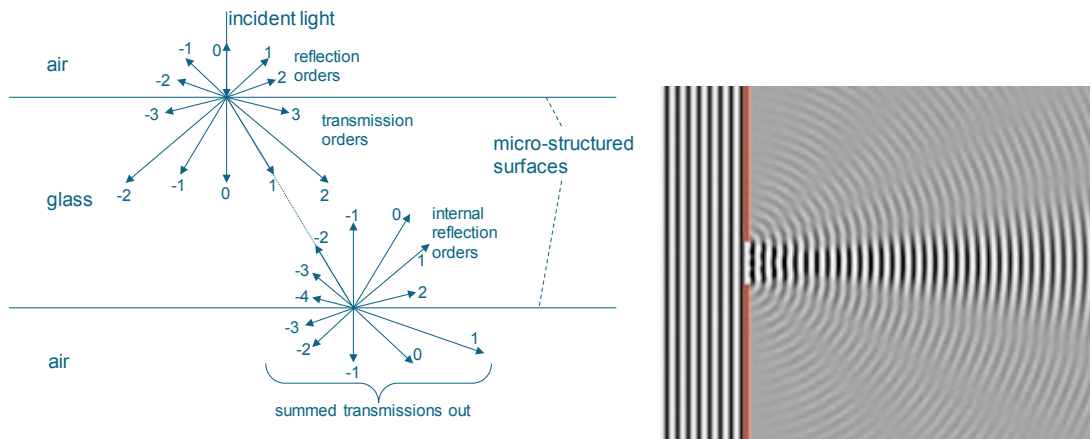
Twee microstructuren zijn met deze software onderzocht: V-groeven en piramides. In de simulaties is onderzocht wat de optimale vorm van de structuur is en wat de optimale configuratie van de structuren op het sample is (Figuur 19.). De optimale hoek ten opzichte van het substraatmateriaal is berekend. Ook is berekend hoe de structuren ten opzichte van elkaar moeten worden aangebracht: dubbelzijdig of enkelzijdig, (voor de piramides) in een vierkante of een hexagonale oriëntatie. Bovendien is het van belang of de structuur met de punt naar boven of naar beneden op het materiaal moet worden aangebracht.



Figuur 19. Configuraties microstructuren (dubbelzijdig micro-V, dubbelzijdige piramides met punten in het materiaal, dubbelzijdige piramides met punten uit het materiaal en dubbelzijdige piramides baksteenmotief met punten in het materiaal).

1.3.3.2 Nanostructuren

Wanneer de structuren in dezelfde orde van grootte worden gemaakt als de golflengte van zichtbaar licht, gelden de wetten van de klassieke optica niet meer. In principe moeten nu de vergelijkingen van Maxwell voor elektromagnetische golven opgelost worden. Vormen de structuren een zich regelmatig herhalend patroon, dan blijkt het materiaal zich te gedragen als een optische tralie (interferentie). Door versterking en uitdoving van lichtgolven blijven alleen reflectie- en transmissiebundels over met zeer specifieke richtingen (zogenaamde orden, Figuur 20.). Ook dit geeft een zeker diffuus karakter. Het oplossen van de Maxwellvergelijkingen is zelfs met speciaal daartoe ontwikkelde software een hachelijke zaak. Rekeningtijden lopen op tot meer dan een dag per structuur als structuren doorgerekend worden voor bijvoorbeeld diffuus invallend licht.



Figuur 20. Diffractie-orden worden toegekend aan elk stukje waar het licht zichzelf versterkt. Tussendoor wordt het licht uitgedoofd.

Als de structuren nog kleiner worden (afmetingen $< 0.1 \times$ golflengte van licht), blijken de berekeningen weer betrekkelijk eenvoudig te worden. Dergelijke kleine structuren worden door de lichtgolven als het ware niet meer 'gezien'. De lokale porositeit vertaalt zich effectief in een zekere lokale brekingsindex, waarvan de waarde ligt ergens tussen die van lucht en die van het substraatmateriaal. Klassieke reflectie- en transmissieregels kunnen weer toegepast worden, waarbij de oppervlakte structuur opgevat kan worden als een multi-layer coating van denkbeeldige laagjes met zeer lage brekingsindex. Optimalisatie van deze structuren leidt tot een helder materiaal met een zeer hoge hemisferische transmissie. In de literatuur (Wilson & Hutley, 1982; Southwell, 1991) wordt gewoonlijk verondersteld dat de netto transmissie hoger en de netto reflectie lager zal zijn naarmate de effectieve brekingsindex meer geleidelijk verloopt van substraat naar lucht. Hoewel dit bij uit één richting invallend licht van één vaste golflengte zeker een goed uitgangspunt is, is dit niet per definitie ook geldig voor diffuus invallend licht met een relatief breed golflengtegebied.

In de literatuur zijn goede resultaten bereikt voor systemen met een geleidelijk verlopende brekingsindex tussen lucht en substraat (bijv. Gombert *et al.* 1998b; Chattopadhyay *et al.* 2010). In de hier uitgevoerde simulaties was dat daarom ook een logisch startpunt. Simulaties zijn uitgevoerd voor optimalisatie van de geleidelijke overgang in brekingsindex voor een aantal structuurvormen. De totale structuurhoogte (h) is opgedeeld in N homogene laagjes van gelijke dikte (h/N). De effectieve brekingsindex n van laagje N is dan een functie van de hoogte z van de structuur ($z=0$ aan de basis, op het substraat; $z=h$ aan de bovenkant van de structuur). Voor de brekingsindex van elk laagje werd de waarde van $n(z)$ in het midden van dat laagje gekozen. De functie $n(z)$ heeft zodoende een vloeiend verloop van $n(0)=n_{\text{sub}}$ naar $n(h)=n_{\text{lucht}}$. De functie kan tussen $z=0$ en $z=h$ diverse vormen aannemen.

De eenvoudigste vorm van geleidelijke overgang in brekingsindex ($n(z)$) is een lineaire functie:

$$n(z) = a - b * z/h \quad (1)$$

Met de randvoorwaarden voor $z=0$ ($n(0)=n_{\text{sub}}$) en $z=h$ ($n(h)=n_{\text{lucht}}$) liggen a en b vast: $a = n_{\text{sub}}$, $b = n_{\text{sub}} - n_{\text{lucht}}$. Door nu echter deze waarden van a en b los te laten en daarin kleine variaties aan te brengen en te berekenen wat het effect daarvan is op diffuus (hemisferisch) invallend licht met een PAR-gewogen golflengteverdeling, kunnen a en b geoptimaliseerd worden voor beste transmissie.

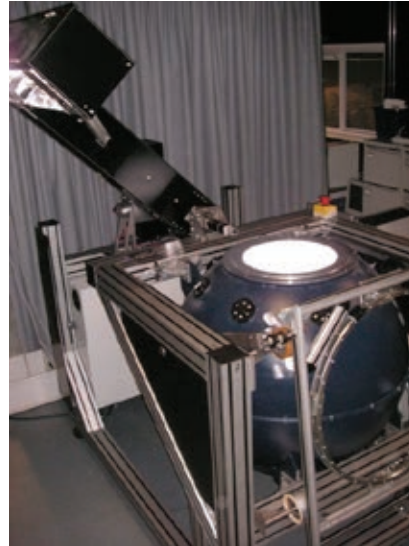
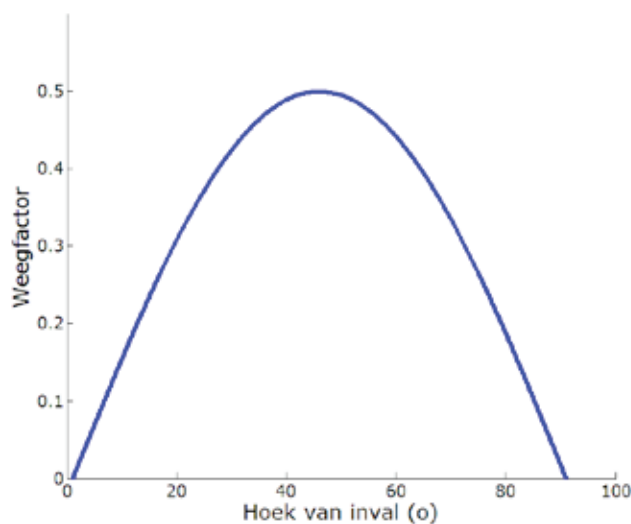
Op soortgelijke wijze zijn ook andere functies $n(z)$ getest en geoptimaliseerd. Resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Sectie 4.1.2.

1.3.4 Metingen

De geoptimaliseerde micro-V structuur uit de modelsimulaties is op laboratoriumschaal gemaakt volgens de in Sectie 3.1 beschreven productiemethode. Deze samples zijn beoordeeld op lichttransmissie en lichtspreiding.

1.3.4.1 Lichttransmissie

Het gewas in de kas groeit op basis van de hoeveelheid licht die er gedurende het jaar door het kasdek heen de planten bereikt. Deze hoeveelheid licht is weergegeven in de waarde voor de hemisferische transmissie. Voor het bepalen van de hemisferische transmissie wordt de transmissie onder verschillende hoeken van inval gemeten (Ruigrok en Swinkels, 2008). De hoekafhankelijke transmissies worden gemeten met een interval van 5 of 10° en in de berekening van de hemisferische doorlatendheid gewogen naar de hoeveelheid tijd gedurende een jaar dat de instraling onder deze hoek voorkomt op een kasdek. De weging verloopt volgens de curve uit Figuur 21A. De hoekafhankelijke metingen worden uitgevoerd met de Transvision meetopstelling zoals beschikbaar in het Lichtlab van Wageningen UR Glastuinbouw (zie Figuur 21B).



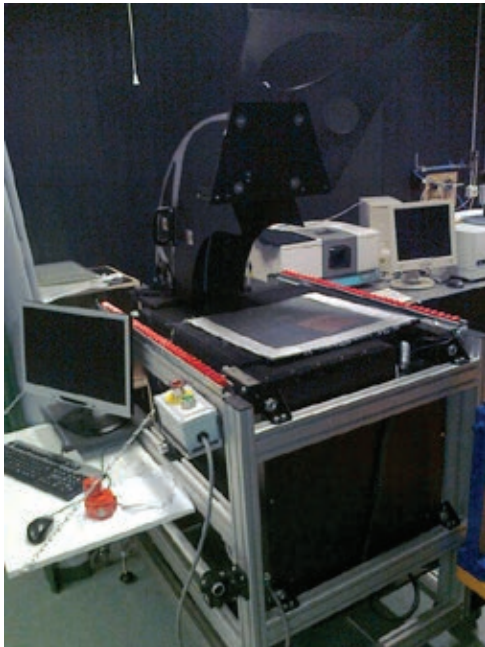
Figuur 21. A. Weegfactor voor de hoeken van inval in de berekening van de hemisferische transmissie, gelijk aan de hoeveelheid tijd per jaar dat de hoek voorkomt. B. Transvision meetapparatuur voor hoekafhankelijke en hemisferische transmissiemetingen.

De spectrale transmissie wordt gemeten met een PerkinElmer Integrating Sphere 270mm InGaAs detector, voor golflengtes tussen 250 en 2500nm (www.perkinelmer.com/).

1.3.4.2 Lichtspreiding

De richting waarin het licht de plant bereikt, bepaalt voor een deel hoe effectief het licht door de plant kan worden opgenomen. Onderzoek heeft aangetoond dat diffuus licht een positief effect heeft op de plantproductie (Dueck *et al.* 2012; Hemming *et al.* 2007), doordat het licht dieper in het gewas kan doordringen en de intensiteit in de - mogelijk overbelichte - kop over de hele plant gespreid wordt. De haze-waarde geeft aan hoeveel van het inkomende licht meer dan $1,5^\circ$ afwijkt van loodrecht doorgelaten licht. Deze waarde wordt gemeten met de Transvision meetopstelling (zie Figuur 21B), waarbij eerst de totale loodrechte transmissie wordt gemeten. Daarna wordt onderin de bol een diafragma geopend, waardoor de loodrechte transmissie niet meer deelneemt aan het meetproces. Nu wordt de intensiteit weer gemeten. Het percentage van het licht dat overblijft na het openen van het diafragma is de haze-waarde.

Een IS-SA opstelling van Radiant Imaging (Figuur 22, www.radiantzemax.com) is gebruikt om de richting van het doorgelaten licht te bepalen (Van Ruijven *et al.* 2012). Deze lichtspreiding wordt beïnvloed door de microstructuren op het oppervlak en kan dus gestuurd worden door het aanpassen van de structuur. Het effect van de lichtspreiding op planten is nog niet bekend.



Figuur 22. IS-SA opstelling van Radiant Imaging, waarmee de lichtspreiding wordt gemeten.

1.3.4.3 Contacthoekhysterese

Contacthoekmetingen zijn uitgevoerd met een Krüss G1 contacthoekmeter (www.kruss.de) om de affiniteit van water met het materiaaloppervlak te bepalen. Een druppel wordt gegroeid op het oppervlak van het materiaal en de hoek die deze druppel tijdens het groeien maakt met het oppervlak wordt gemeten (advancing contacthoek, zie Figuur 8.). Daarna wordt er langzaam weer water uit de druppel gezogen met een naald en wordt de contacthoek gemeten op het moment dat het raakvlak met het oppervlak nog juist gelijk blijft (receding contacthoek). Het verschil tussen de advancing en de receding contacthoek wordt de contacthoekhysterese genoemd en geeft aan wat het gedrag van een waterdruppel op een oppervlak is.

1.3.4.4 Emissiviteit

De emissiviteit van het materiaal is een waarde voor de uitstraling van warmte door een object, afhankelijk van de temperatuur van dat object. Deze waarde is van belang voor het energiegebruik van het kassysteem. De straling van een sample is opgedeeld in transmissie, reflectie en emissie

$$e(\lambda = 1600 - 25000\text{nm}) = 1 - Tr - Rf \quad (2)$$

Voor de samples die in dit project gemaakt zijn, is de transmissie en de reflectie voor het golflengtegebied van 1600-25000nm gemeten met een Varian fotospectrometer (www.varianftirchem.com). Een (geïdealiseerd) zwart lichaam heeft geen transmissie en reflectie, waardoor alleen emissie overblijft. De emissie is berekend volgens de wet van Planck (www.support.fluke.com)

$$L(\lambda, T) = c1/(\lambda^5 e^{c2/\lambda T} - 1) \quad (3)$$

met $c1 = 1.191044e^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^2\text{sr}^{-1}$ en $c2 = 1.438769e^4 \mu\text{mK}$

De gemeten waarden zijn volgens (3) per golflengte gewogen naar het spectrum van een zwarte straler en geïntegreerd over het golflengtegebied, waarna in (2) de emissie van het sample is te berekenen. De verwachting is dat structuren een effect hebben op deze emissiviteit van binnen naar buiten de kas, door een verandering in de transmissie en de reflectie. Hoe lager de emissiviteit, hoe beter de warmte wordt vastgehouden in de kas. Een verhoging van de emissiviteit door het aanbrengen van structuren zorgt voor een verhoging van de warmtevraag in de kas.

1.3.5 Niet-technische bespiegelingen

1.3.5.1 Economische haalbaarheid

De economische evaluatie is uitgevoerd door middel van een partiële kosten-baten analyse. Hierbij worden de extra opbrengsten en de extra kosten ten opzichte van een referentiesituatie (teelt onder gehard transparant glas) in kaart gebracht. Daarnaast is diffuus glas ook als referentiekader meegenomen, omdat dit een concurrerend alternatief is voor micro-V en nano-structuren.

In de referentiesituatie is een tomaten, rozen en phalaenopsis teelt als uitgangspunt genomen (Vermeulen, 2013). Deze gewassen staan min of meer model voor de sub-sectoren glasgroente, snijbloemen en potplanten. Voor de bepaling van de investeringen en kosten van de nieuwe structuren op kasdekken is uitgegaan van informatie van R. Wilde van Nanoptics. Dit zijn zeer globale schattingen, omdat de verschillende structuren nog niet uitontwikkeld of praktijkrijp bleken te zijn. Deze globale indicaties zijn gebruikt om een indruk te krijgen van de minimaal noodzakelijke meerproductie of energiebesparing mede in het licht van het toekomstperspectief. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Voor de belangrijkste parameters (prijsspeil productie en energie) is nagegaan wat het effect is van deze parameters op de haalbaarheid van de structuren.

In de economische haalbaarheid is uitgegaan van de resultaten uit het technisch onderzoek met micro-V en nanostructuren op glas en kunststof. Dit technische onderzoek leverde een aantal voor- en nadelen op voor een aantal invloedfactoren op de teelt, die vermeld zijn in de resultatensectie van dit rapport. De informatie die uit deze analyse naar voren is gekomen, is gebruikt voor het maken van een business case door mogelijk toekomstige producenten van gestructureerd kasdek materiaal.

1.3.5.2 Sociaal-wetenschappelijke aspecten

De micro-V of nano gestructureerde materialen kunnen op termijn een substitutie betekenen van bestaande kasdekmaterialen en schermmaterialen in de glastuinbouw. Tegen deze achtergrond zijn drie sociale aspecten bekeken:

- Sociale kenmerken van technische innovaties
- Toekomstverkenning
- Innovatieproces.

Door middel van een beknopte literatuurstudie is nagegaan in hoeverre de nieuwe structuren in kasdeken draagvlak kunnen vinden onder belangrijke stakeholders (glasfabrikanten, kassenbouwers en installateurs). Ook is bekeken of en in welke mate deze innovatie past in het licht van andere ontwikkelingen en tendensen binnen en buiten de glastuinbouw.

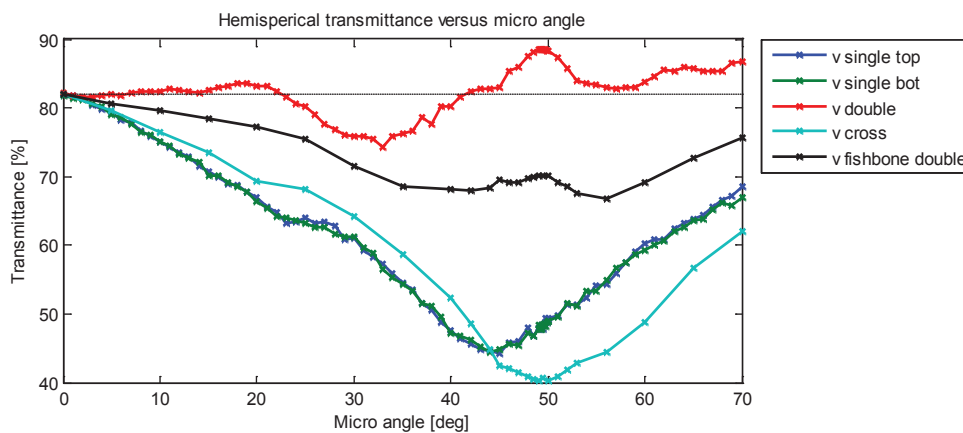
Met betrekking tot het innovatieproces was een monitoring- en evaluatietraject opgenomen in het projectplan. Hierin wordt beoogd de attitude en gedrag van de potentiële eindgebruikers gedurende de looptijd van het project te volgen. Gezien de resultaten in het onderzoek- en ontwikkelingsproject is - behoudens een gebruikersgroep bijeenkomst aan het begin van het project - het monitoring en evaluatie traject niet uitgevoerd. Het project is afgesloten met een workshop voor partijen uit de kasindustrie (en PV-industrie) om de kennis te delen en het nut voor vervolg te inventariseren.

1.4 Resultaten

1.4.1 Modelberekeningen

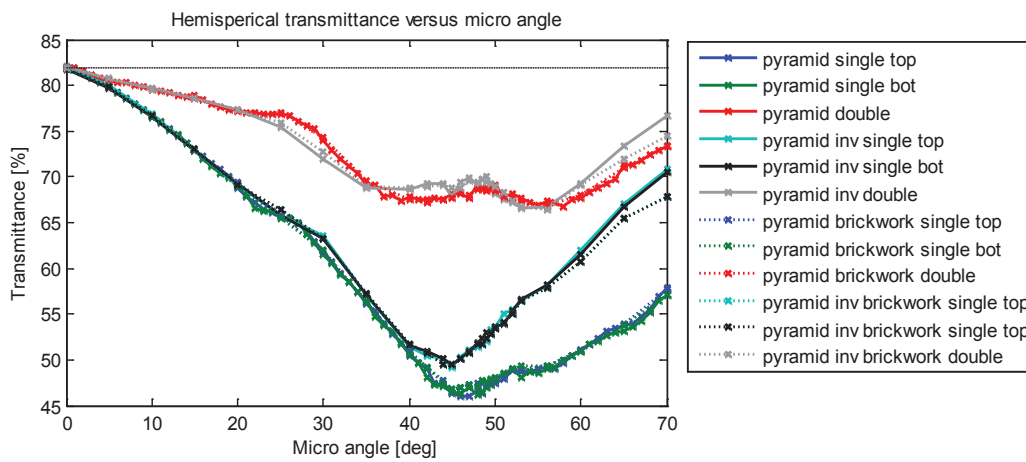
1.4.1.1 Microstructuren

Voor de micro V-groef is een optimalisatie uitgevoerd naar de microhoek die de structuur maakt ten opzichte van het vlakke materiaal. Dit is gedaan voor enkelzijdig (met de structuur aan de bovenzijde of aan de onderzijde) en dubbelzijdig gestructureerd materiaal (met de structuren parallel, gekruisd of in een visgraatmotief). Figuur 23. laat het resultaat van de optimalisatie zien. De gestippelde lijn laat de hemisferische transmissie van het vlakke uitgangsmateriaal zien (82%). Uit Figuur 23. wordt duidelijk dat alleen de dubbelzijdig parallelle V-groef een verbetering van de hemisferische transmissie kan geven, oplopend tot 7%. De optimale hoek van de V-groef in deze configuratie is 49° . Bij afwijking van de hoek van meer dan 1° neemt de hemisferische transmissie significant af. Dit effect geldt voor afmetingen van de V-groef groter dan $5\text{-}10\mu\text{m}$.



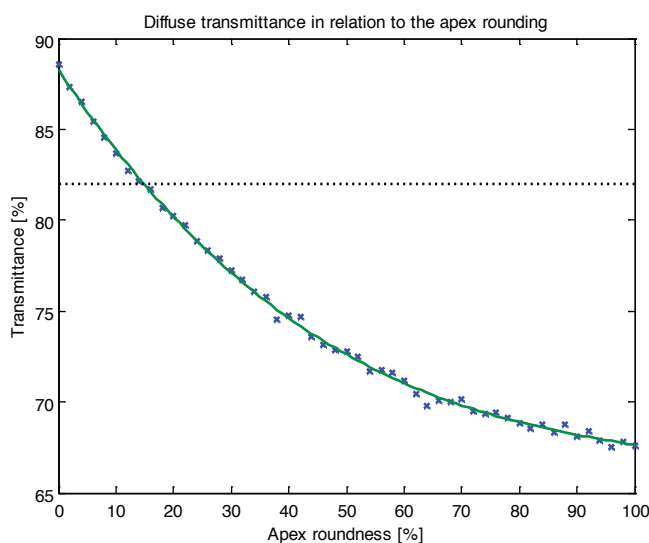
Figuur 23. Optimalisatie van de hemisferische transmissie door het aanpassen van de micro-hoek ten opzichte van horizontaal voor verschillende configuraties van een micro-V structuur (gemodelleerd voor licht van 590nm).

Ook voor verschillende configuraties van micropiramides is een optimalisatie uitgevoerd naar de hoek ten opzichte van het vlakke materiaal. Figuur 24. vergelijkt de hemisferische transmissie van deze configuraties met het vlakke uitgangsmateriaal. Hieruit blijkt dat geen enkele configuratie van micropiramides een verhoging in de hemisferische transmissie geven. De dubbelzijdige piramides hebben een hogere hemisferische transmissie dan de enkelzijdige piramides. Plaatsing van de piramides in een baksteenmotief of in een matrix maakt geen verschil voor de transmissie.



Figuur 24. Optimalisatie van de hemisferische transmissie door het aanpassen van de micro-hoek ten opzichte van horizontaal voor verschillende configuraties van een micro-piramide structuur.

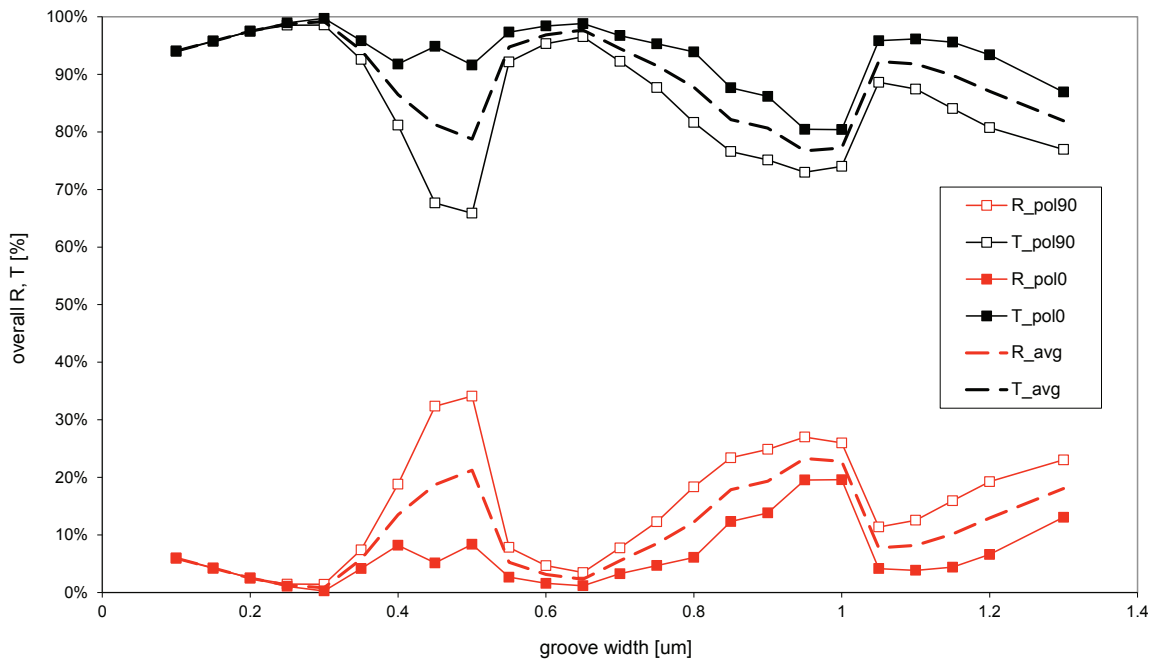
De dubbelzijdig, parallel aangebrachte V-groef is de enige microstructuur die in de simulaties van microstructuren een verhoging in de hemisferische transmissie geeft. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd naar het belang van het scherp aanbrengen van de microstructuur in het oppervlak van het materiaal, door de pieken en de dalen van de structuur af te ronden (Figuur 16.). Gevonden is dat bij een afronding van de pieken (apex roundness) van 15% de winst in de hemisferische transmissie teniet gedaan is (zie Figuur 25.). Deze afronding moet dus bij de productie van de samples zoveel mogelijk voorkomen worden (de structuur moet zo scherp en precies mogelijk aangebracht worden). Het afronden van de structuren mag ook bij toepassing in de praktijk tijdens de levensduur van het materiaal niet optreden onder invloed van weersomstandigheden en vervuiling.



Figuur 25. Hemisferische transmissie in relatie tot de scherpheid van de microstructuur voor een dubbelzijdige toepassing van micro-V. Apex roundness is de afronding van de pieken en dalen van de figuren.

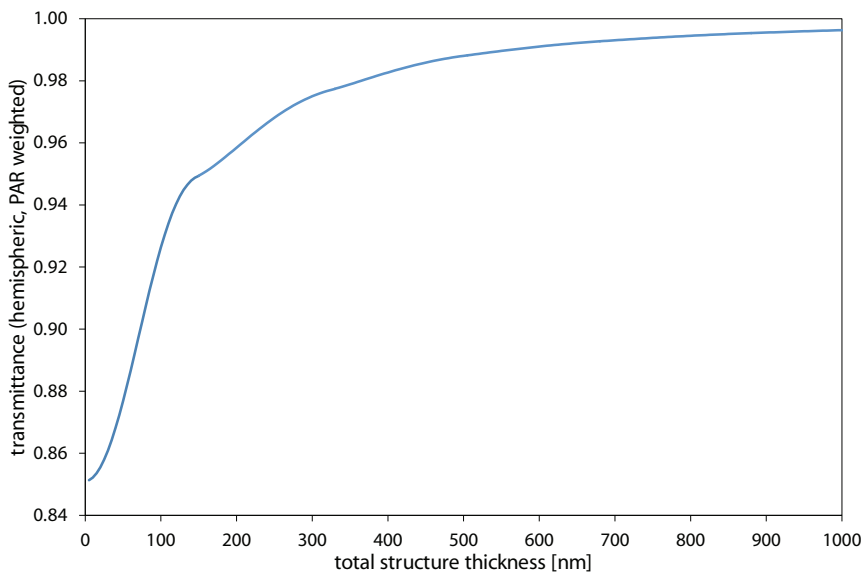
1.4.1.2 Nanostructuren

De structuren met een afmeting in de orde van grootte van de golflengte van licht laten een verband zien tussen de afmeting en de transmissie. Een simulatie van een micro-V structuur is uitgevoerd met loodrecht invallend licht met een golflengte van 500nm. De afmeting van een micro-V structuur is daarbij gevarieerd van 0.2 keer de golflengte tot 2.5 keer de golflengte van het licht. In Figuur 26. is te zien dat de reflectie het hoogst is en de transmissie het laagst als de structuur een veelvoud is van de golflengte (250nm, 500nm, 1000nm). Als de structuur net iets groter is dan het veelvoud van de golflengte, dan laat het een piek in de transmissie zien. Figuur 26. laat zien dat er voor loodrechte inval met een V-structuur op nanometerschaal ook lichtwinst te boeken is.

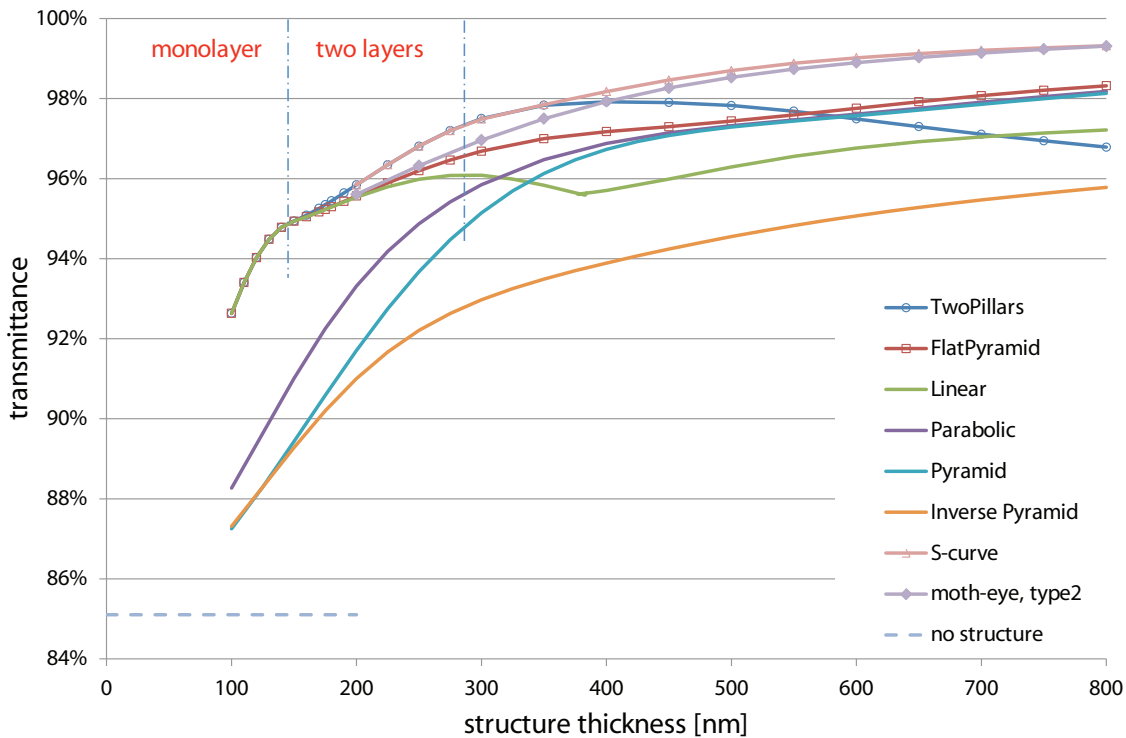


Figuur 26. De transmissie en reflectie van micro-V gestructureerd materiaal bij loodrecht invallend licht met een golflengte van 500nm, met als variabele de afmeting van de microstructuur.

In modelberekeningen naar structuren kleiner dan de golflengte van het licht is het effect van de hoogte (h) van de structuren op de hemisferische transmissie onderzocht. Bij een vastgestelde h is de structuurvorm (n(z), zie Vergelijking 1 in Sectie 3.3.2) geoptimaliseerd. Figuur 27. laat zien dat een toenemende hoogte van de nanostructuur over het algemeen een toenemende transmissie tot gevolg heeft. Voor een relatief kleine hoogte blijken structuren met een lineaire overgang in brekingsindex al toereikend, ingewikkelder structuurvormen geven hier geen verbetering in de transmissie. Naarmate h groter wordt, blijken structuren met een meer vloeiende vorm effectiever (Figuur 28.).

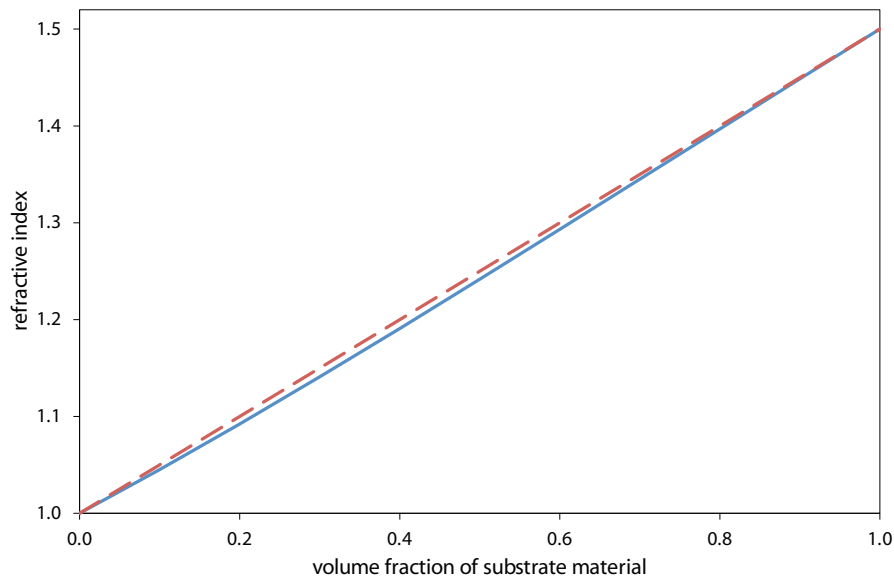


Figuur 27. Hemisferische transmissie in relatie tot de totale hoogte van de nanostructuur; structuurvorm voor elke hoogte geoptimaliseerd naar beste transmissie.



Figuur 28. Bij lage structuurhoogtes zijn simpele lineaire functies toereikend, bij grotere dikte worden ingewikkelder functies $n(z)$ effectiever.

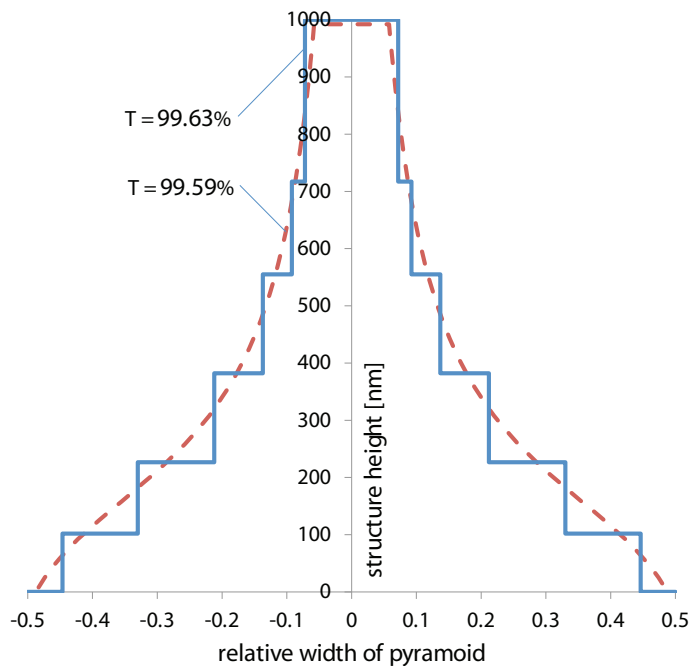
Wanneer de optimale functie $n(z)$ is gevonden voor een bepaalde structuurhoogte, moet deze nog vertaald worden naar een daadwerkelijke structuur. Of beter: de feitelijke structuur is niet van belang, alleen de volumeverhouding van substraatmateriaal en lucht in de denkbeeldige laagjes. Op basis van de 'effective medium' theorie is de effectieve brekingsindex te herleiden tot een porositeit van de laagjes. De methode van Bruggeman (zie Choy, 1999) lijkt het meest geschikt. Aangezien de brekingsindices van substraat (ca. $n=1.5$) en lucht ($n=1.0$) niet al te veel verschillen, is in een eerste benadering de porositeit op te vatten als een lineaire functie van de effectieve brekingsindex (Figuur 29.).



Figuur 29. Relatie tussen volumefractie van substraatmateriaal (=1-porositeit) en effectieve brekingsindex volgens theorie van Bruggeman (substraat $n=1.5$; lucht $n=1.0$). Gebroken lijn lineaire benadering.

Het is een nadeel van de bovengenoemde optimalisatieprocedure dat er eerst een functievorm $n(z)$ gekozen moet worden, waarna deze geoptimaliseerd kan worden. Het is echter niet te zeggen welke functievorm de beste keuze is. Een verdere optimalisatie is mogelijk door een geoptimaliseerde functievorm als uitgangspunt te nemen, waarna de strikte eis van die functievorm losgelaten wordt. Vervolgens kan de brekingsindex van elk laagje onafhankelijk gevarieerd en geoptimaliseerd worden.

Dit proces is weergegeven in Figuur 30. Het toont een dwarsdoorsnede van een piramideachtige structuur van 1000nm hoog, geoptimaliseerd voor maximale hemisferische transmissie en gewogen voor het PAR-golflengtegebied. Merk op dat de x-as relatief is ten opzichte van de breedte van de structuur in een regelmatig vierkant patroon van piramides; de x- en y-as hebben dus niet dezelfde schaal. De gebroken lijn toont de optimale vorm bij een S-vormige functie $n(z)$; de structuur is daarbij verdeeld in 60 denkbeeldige laagjes. Vormvrije optimalisatie van elk van die laagjes leverde uiteindelijk de getrapte vorm op. De winst van de getrapte vorm ten opzichte van de gladde vorm is echter zeer klein (slechts ca. 0.04% extra transmissie). Dit laat zien dat kleine afwijkingen van die vorm nauwelijks afbreuk zullen doen aan de transmissie als eenmaal een structuurvorm is gevonden die een hoge transmissie geeft.



Figuur 30. Optimalisaties van piramideachtige structuur met hoogte van 1000 nm; gebroken curve geoptimaliseerde gladde functievorm; getrokken curve vormvrije optimalisatie van de gebroken curve met een getrapte vorm als eindresultaat. T hemisferische transmissie, gewogen voor PAR-golflengtes.

Opmerkelijk is ook dat bovenstaande resultaat illustreert dat de beste structuurvorm geen glad verloop hoeft te hebben tussen n_{sub} en n_{lucht} . De getrapte vorm blijkt ook bij andere structuurhoogtes de hoogste transmissie op te leveren, ook al is het verschil met een optimale gladde vorm meestal klein. Weliswaar heeft de voet van de piramide bijna de breedte van de 'pitch', maar de top loopt duidelijk niet uit in een scherpe punt. Dit betekent dat aan de top een (kleine) sprong optreedt in effectieve brekingsindex.

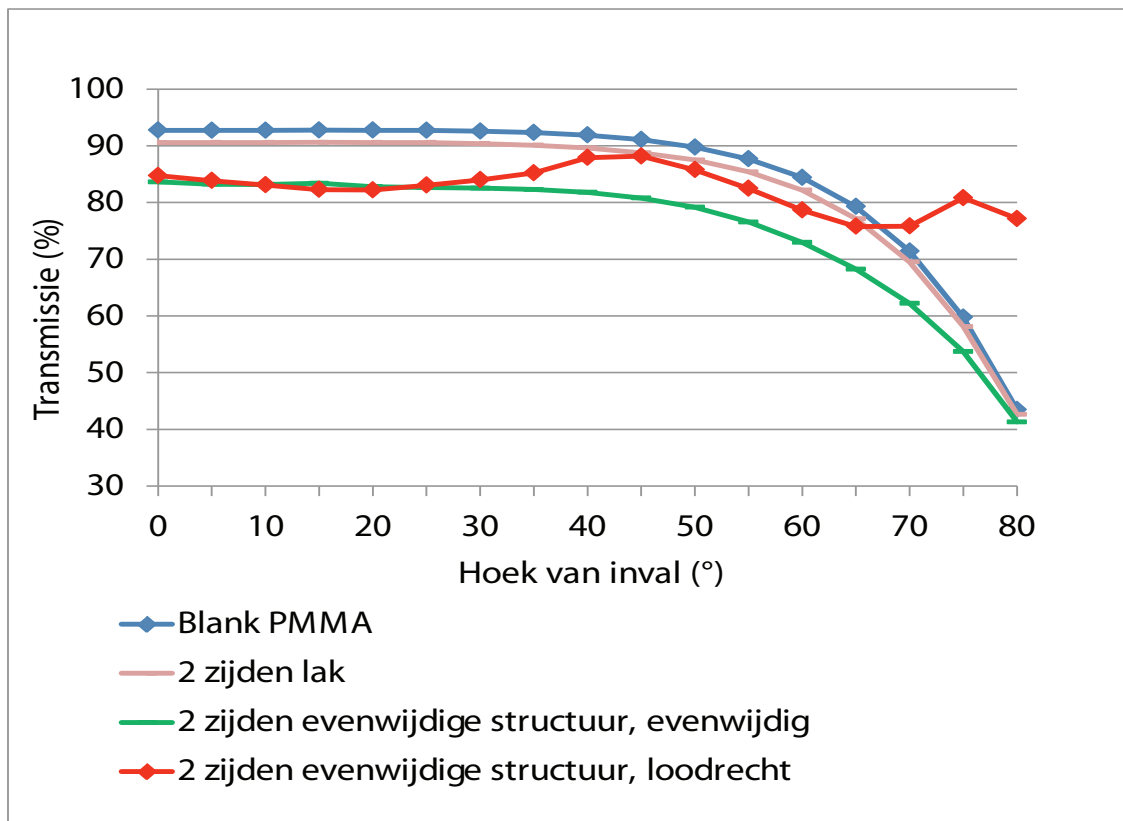
1.4.2 Metingen

1.4.2.1 Micro-V structuur

1.4.2.1.1 Lichttransmissie

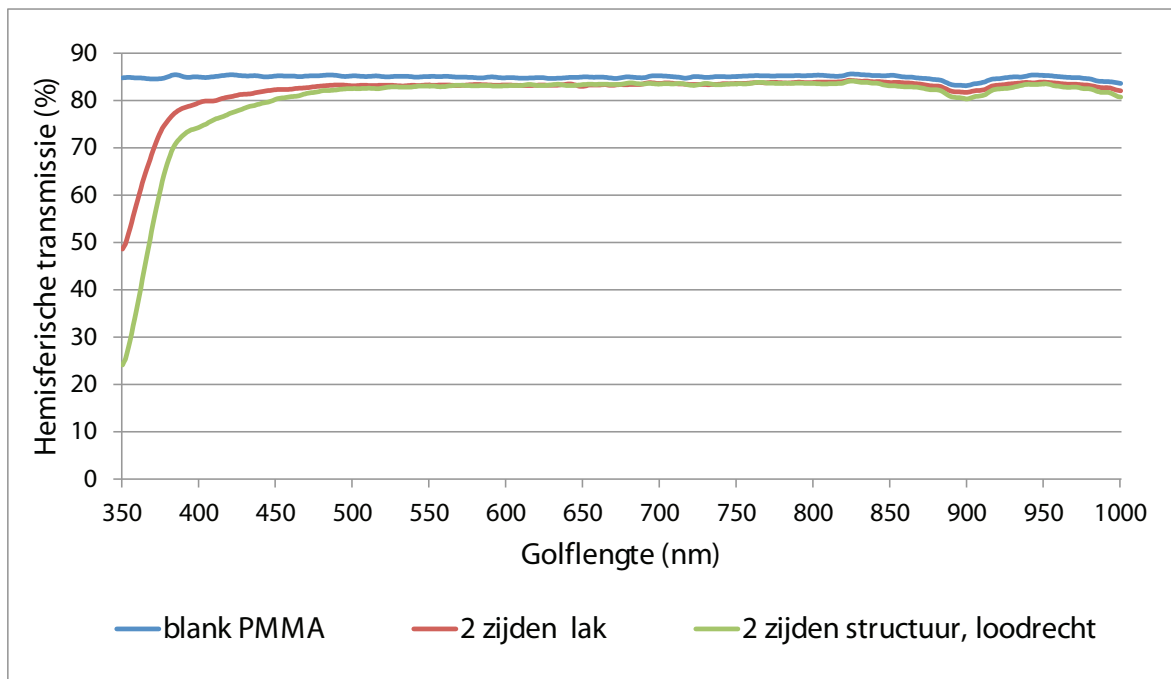
De firma Nanoptics heeft samples gemaakt van de micro-V structuur met een hoek van 49° en een afmeting van $100\mu\text{m}$, volgens de methode zoals beschreven in Sectie 3.1. Deze samples hebben een afmeting van $30 \times 30 \text{ cm}$. De hoekafhankelijke transmissie van de het dubbelzijdige micro-V sample is in Figuur 31. vergeleken met het referentiemateriaal en met een sample waarop aan beide zijden ongestructureerde lak is aangebracht. De UV-uithardende lak laat bij alle hoeken van inval een verlies van ongeveer 1% per zijde zien. Dit verlies moet gecompenseerd worden door de structuur die wordt aangebracht in de lak, waarna er ook nog winst gemaakt moet worden ten opzichte van de referentie.

Het sample met de dubbelzijdige micro-V structuur is twee keer gemeten, één keer met de structuur evenwijdig aan en één keer loodrecht op de lichtbundel van de meetopstelling. Voor loodrechte inval maakt de oriëntatie geen verschil, maar bij grotere hoeken van inval is het beter om de structuur loodrecht op de invallende lichtbundel te oriënteren. Voor de berekening van de hemisferische transmissie is een gemiddelde genomen van de loodrechte en de evenwijdige oriëntatie, omdat de lichtbundel in de praktijk (zon) beide kanten tegelijkertijd op beweegt. De hemisferische transmissie van dit sample wordt dan 78.8%, wat een verlies van 6.2% betekent ten opzichte van de referentie. In de simulaties kwam echter een winst van 7% naar voren.



Figuur 31. Hoekafhankelijke transmissie van dubbelzijdig micro-V materiaal met een hoek van 49° en een afmeting van $100\ \mu\text{m}$, vergeleken met referentiemateriaal. Evenwijdige structuur betekent aan beide zijden van het materiaal de groeven evenwijdig aan elkaar, evenwijdig betekent dat de groeven evenwijdig aan de lichtstralen zijn georiënteerd op de meetopstelling.

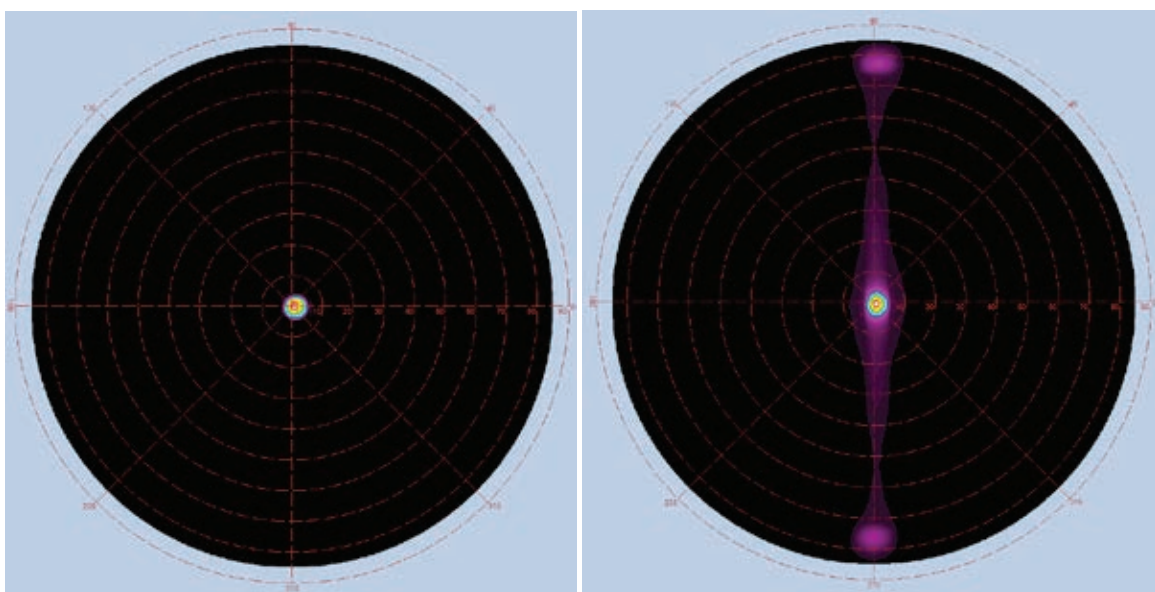
Figuur 32. is een weergave van de hemisferische transmissie als functie van de golflengte van het licht en laat zien dat het referentiemateriaal geen golflengtegebieden heeft waar een lagere transmissie optreedt. Figuur 32. toont ook dat de lak UV-licht absorbeert uit het spectrum. De transmissie voor golflengtes kleiner dan 500nm is lager dan voor grotere golflengtes.



Figuur 32. hemisferische transmissie uitgezet tegen de golflengte voor dubbelzijdig micro-V materiaal (loodrecht is structuren loodrecht op de richting van het inkomende licht).

1.4.2.1.2 Lichtspreiding

Het is daarnaast nuttig om te zien in welke richtingen het licht verstrooid wordt, omdat regelmatig geordende structuren het licht kunnen sturen. Informatie uit deze metingen kan gebruikt worden om de lichtspreiding in de kas te optimaliseren. Uit metingen blijkt dat de haze-waarde van dubbelzijdig gestructureerd micro-V materiaal 48% is. Figuur 33. laat de lichtspreiding van dubbelzijdig micro-V materiaal zien, naast de lichtspreiding van floatglas. Het loodrecht invallende licht wordt door het dubbelzijdig gestructureerde micro-V materiaal in een lijn verspreid, met maxima rond het loodrecht doorgelaten licht en bij hoeken van 80° .



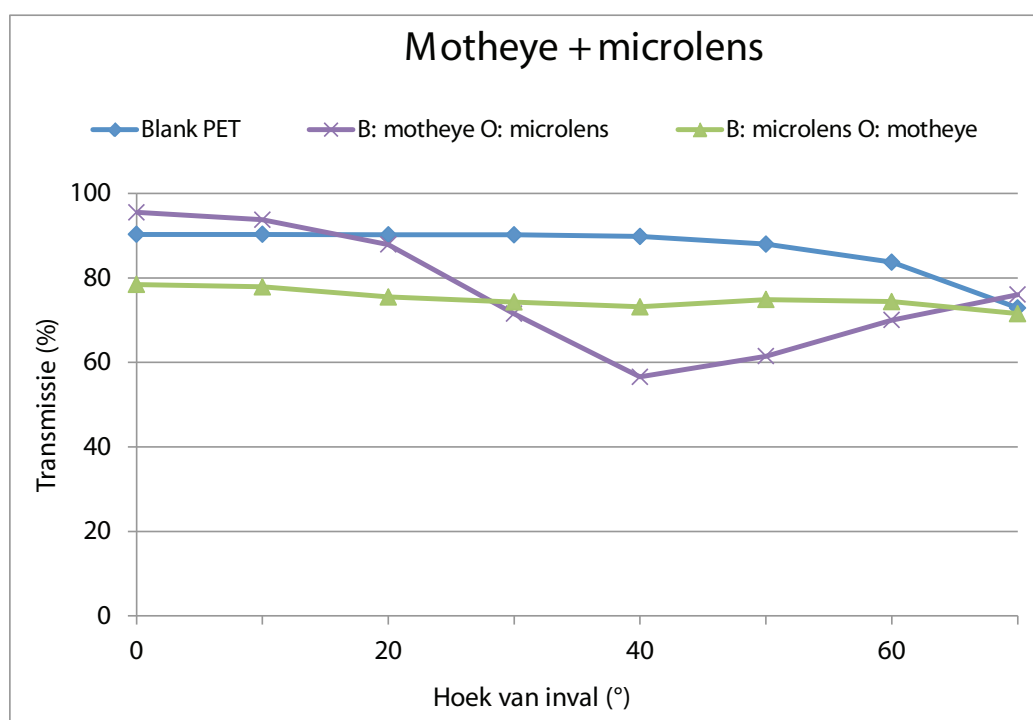
Figuur 33. Lichtspreiding door helder glas (referentiemateriaal) en door dubbelzijdig micro-V gestructureerd glas.

1.4.2.2 Microlens, motheye en diffusor

Naast micro-V gestructureerd materiaal is ook onderzocht of er andere structuren beschikbaar zijn die de hemisferische transmissie kunnen verbeteren, of kunnen zorgen voor een goede lichtverstrooiing. Na een brainstormsessie met toeleverancier Nanoptics zijn de microlens, motheye en diffusor gekozen als meest interessante structuren om te onderzoeken. De motheye structuur is afgeleid van insectenogen in de natuur, waar ze gebruikt worden om de reflectie van het oog zo klein mogelijk te houden en ontdekking door roofdieren te voorkomen. Het is een nanostructuur die kan zorgen voor een geleidelijke overgang in brekingsindex en daarmee een vermindering van de reflectie en een toename in de transmissie (zie ook Sectie 3.3.2 voor berekeningen). De gebruikte motheye structuur heeft een hoogte van 287nm en een afmeting van 250nm. De structuur is niet diffuus, maar omdat de afmeting dicht in de buurt ligt van de golflengten van zichtbaar licht, is er wel enige diffractie te zien. De motheye is gecombineerd met een microlens en met een industriële diffusor om toch tot een diffuus sample te komen. De structuren zijn weer aangebracht volgens de methode beschreven in Sectie 3.2, met PET als referentiemateriaal.

1.4.2.2.1 Lichttransmissie

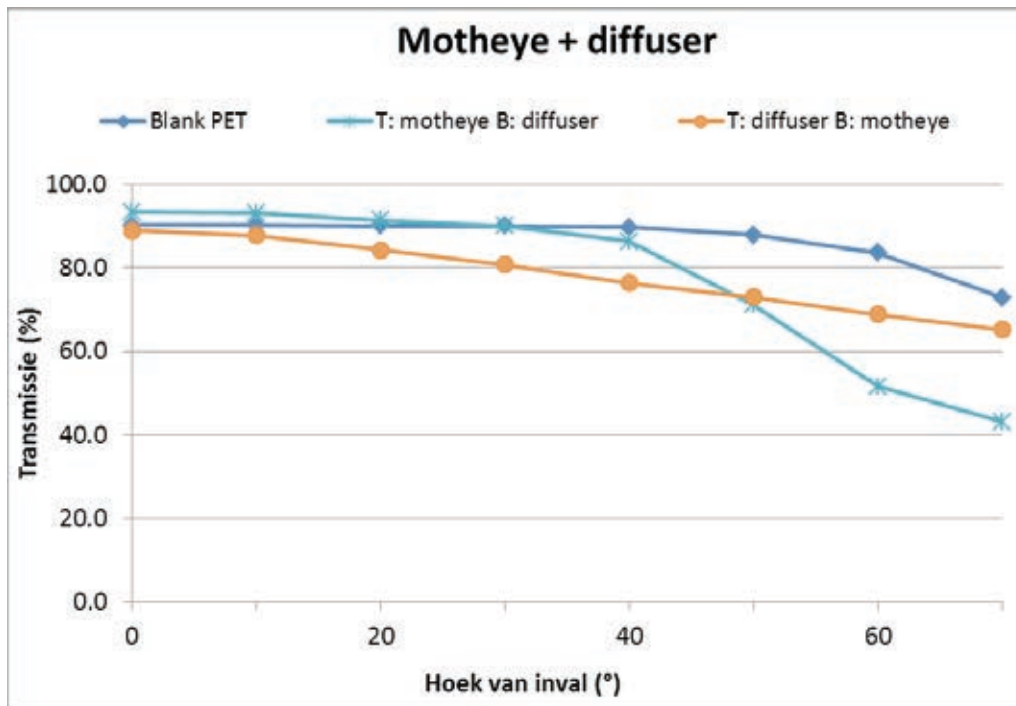
Uit de metingen blijkt, dat PET zonder lak en zonder structuur als referentiemateriaal een hemisferische transmissie heeft van 84%. Wanneer aan beide zijden van het materiaal een motheye-structuur wordt aangebracht, verhoogt dit de hemisferische transmissie tot 91%. Toepassen van deze structuren verhoogt de hoeveelheid beschikbaar licht in de kas met 7%, wat bij goede overige omstandigheden een verhoging in de productie tot gevolg kan hebben. Deze structuurcombinatie is echter niet diffuus, zodat er ook naar andere combinaties is gekeken.



Figuur 34. Hoekafhankelijke transmissie van combinatie van microlens en motheye; B bovenkant, O onderkant.

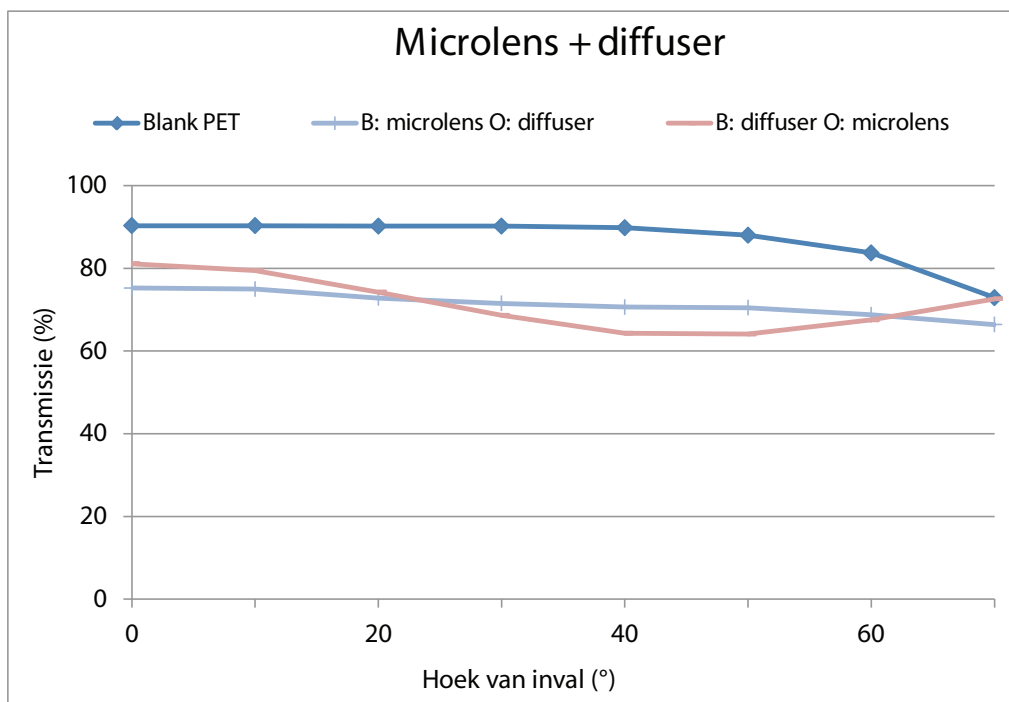
De loodrechte transmissie van een sample met aan de bovenzijde een motheye-structuur en aan de onderzijde een microlens is 5% hoger dan het uitgangsmateriaal (Figuur 34.). Bij een hoek van inval van 20° is de transmissie gelijkwaardig aan het referentiemateriaal en bij grotere hoeken van inval is de hoekafhankelijke transmissie steeds lager dan de referentie. Dit geldt ook voor het sample met de microlens aan de bovenzijde en de motheye aan de onderzijde voor alle hoeken van inval. Het diffuus maken van het materiaal door het aanbrengen van een microlens verlaagt dus de hemisferische transmissie van 84% met 12% (motheye boven) tot 15% (microlens boven).

Naast de microlens is er een onregelmatige diffusor-structuur beschikbaar, die speciaal ontworpen is om een hoge transmissie te hebben. Als de microlens vervangen wordt door deze diffusor-structuur, is de loodrechte transmissie gelijk aan of hoger dan het referentiemateriaal, afhankelijk van de oriëntatie (Figuur 35.). Bij het plaatsen van de diffusor structuur aan de onderzijde van het materiaal, neemt de loodrechte transmissie met 3% toe en blijft de hoekafhankelijke transmissie hoger dan het referentiemateriaal tot een hoek van inval van 30°. De transmissie neemt snel af bij de belangrijkste hoeken voor de hemisferische transmissie. Wanneer de diffusor-structuur aan de bovenzijde wordt aangebracht, is de transmissie over alle hoeken van inval lager dan het referentiemateriaal. Voor de hemisferische transmissie betekent dit een verlies van 13% met de diffusor aan de onderkant en een verlies van 11% met de diffusor aan de bovenzijde van het materiaal.



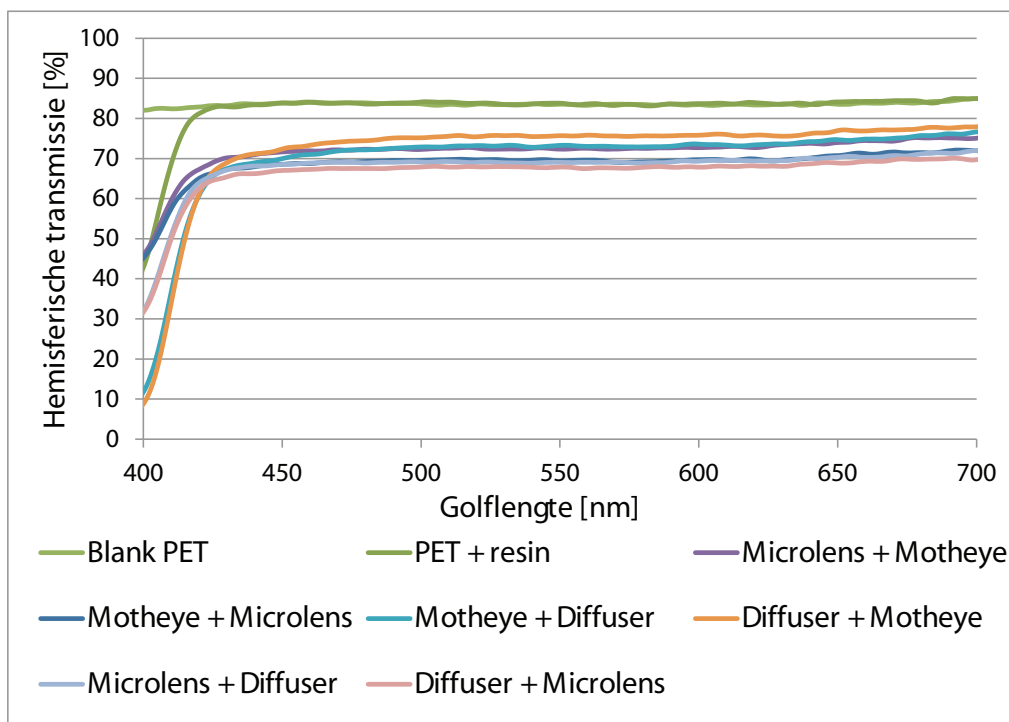
Figuur 35. Hoekafhankelijke transmissie van combinatie van motheye en diffuser; B bovenkant, O onderkant.

Wanneer de microlens gecombineerd wordt met de diffusor, neemt de hoekafhankelijke transmissie in beide oriëntaties af, zoals weergegeven in Figuur 36. De hemisferische transmissie neemt met 16% af.



Figuur 36. Hoekafhankelijke transmissie van combinatie van microlens en diffuser; B bovenkant, O onderkant.

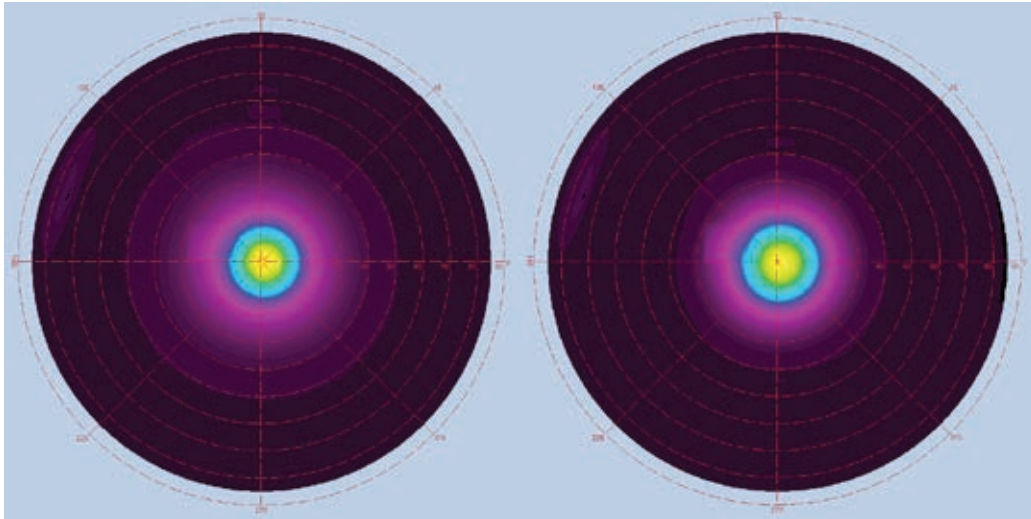
De spectrale transmissie van de samples met gecombineerde structuren is weergegeven in Figuur 37. Hierin is weer te zien dat het aanbrengen van de lak een vermindering in de transmissie van het Uv-licht tot gevolg heeft. PET laat in vergelijking met PMMA minder Uv-licht door. Verder valt het op dat vooral voor de combinaties motheye-diffusor en microlens-diffusor de transmissie toeneemt bij een hogere golflengte. Het omdraaien van het sample heeft verder weinig invloed op de spectrale transmissie.



Figuur 37. Hemisferische spectrale transmissie voor de combinaties van microlens, motheye en diffusor structuren.

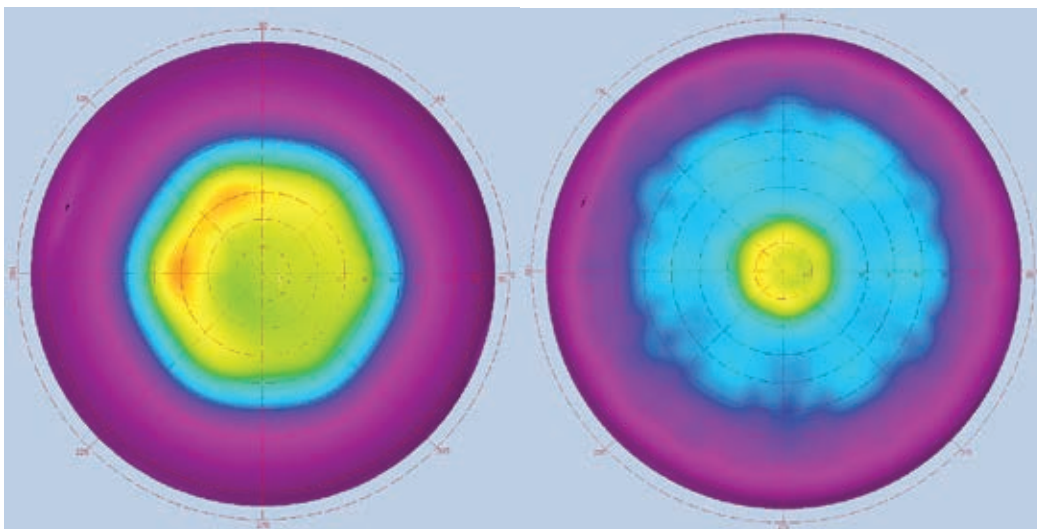
1.4.2.2 Lichtspreiding

De structuurcombinaties zoals hierboven besproken, hebben een volledig ander lichtspreadsingspatroon dan de micro-V structuur, zoals te zien is in de Figuur 38-40. De haze-waarden van deze drie samples zijn 91-93%. In Figuur 38. is de combinatie motheye-diffusor te zien. In deze combinatie zorgt alleen de diffusor voor spreiding van het licht en omdat de diffusor een onregelmatige structuur heeft, is de oriëntatie van het sample niet van belang voor het spreidingspatroon. Het sample met de diffusor naar het licht (boven) toe, heeft de hoogste hemisferische transmissie en deze oriëntatie is daarom het meest geschikt om te worden toegepast in de glastuinbouw. Helaas is de transmissie wel lager dan het referentiemateriaal, dus toepassing zal niet gaan plaatsvinden.



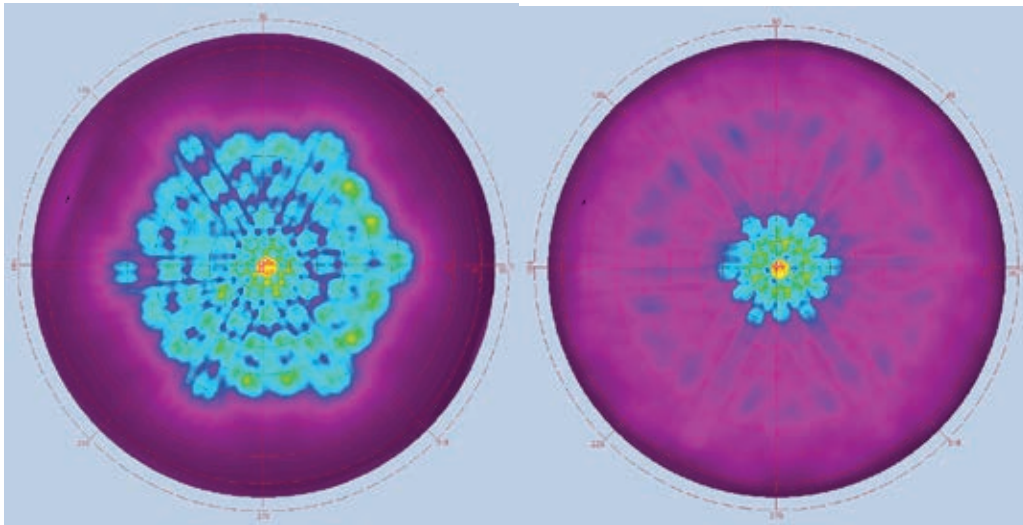
Figuur 38. Lichtspreadsingspatroon voor de combinatie motheye-diffusor voor de twee oriëntaties.

De combinatie microlens-diffusor laat een volledig ander lichtspreadsingspatroon zien, veel breder dan de diffusor alleen (Figuur 39.). Ook de oriëntatie van het sample is hier van belang voor de lichtspreading. Het effect van deze lichtspreading op plantengroei in kassen is niet onderzocht, omdat er geen structuren gevonden zijn met een hoge hemisferische transmissie. Een opzet is wel gemaakt voor het onderzoeken van het effect van deze structuren op plantengroei (zie Bijlage II). Bij lage lichtniveaus zal het effect van het toelaten van extra licht groter zijn dan het spreiden van het licht.



Figuur 39. Lichtspreadsingspatroon voor de combinatie microlens-diffusor voor de twee oriëntaties.

De combinatie microlens-motheye uit Figuur 40. laat weer een ander spreidingspatroon zien, waarbij een duidelijk verschil tussen de oriëntaties optreedt.

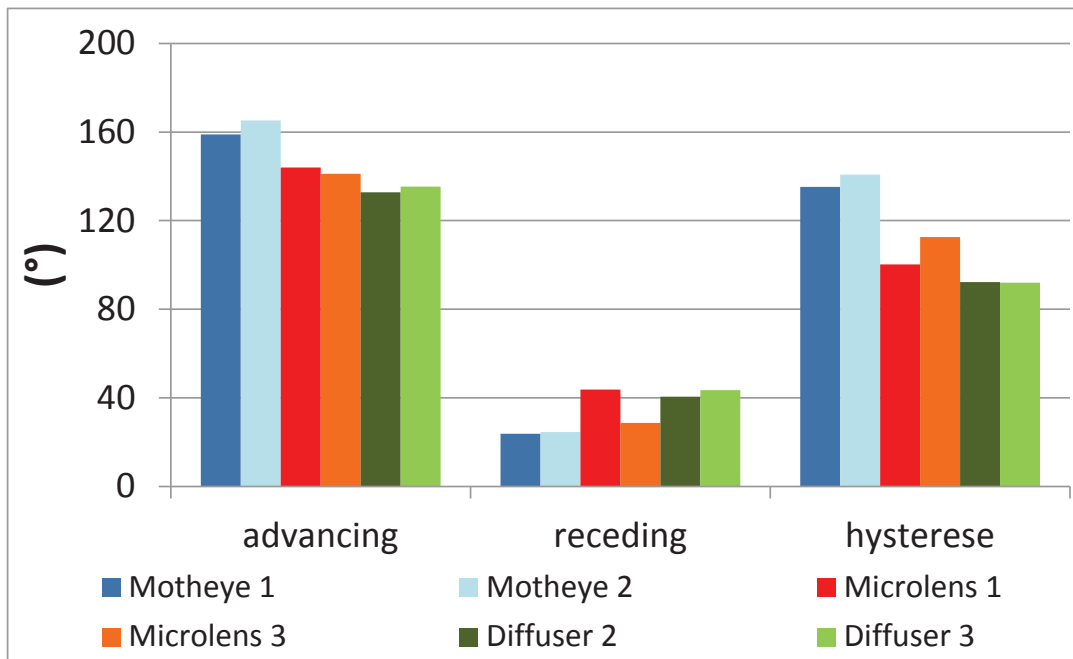


Figuur 40. Lichtspreidingspatroon voor de combinatie van microlens-motheye voor de twee oriëntaties.

1.4.2.2.3 Overige eigenschappen: contacthoekhysterese en emissiviteit

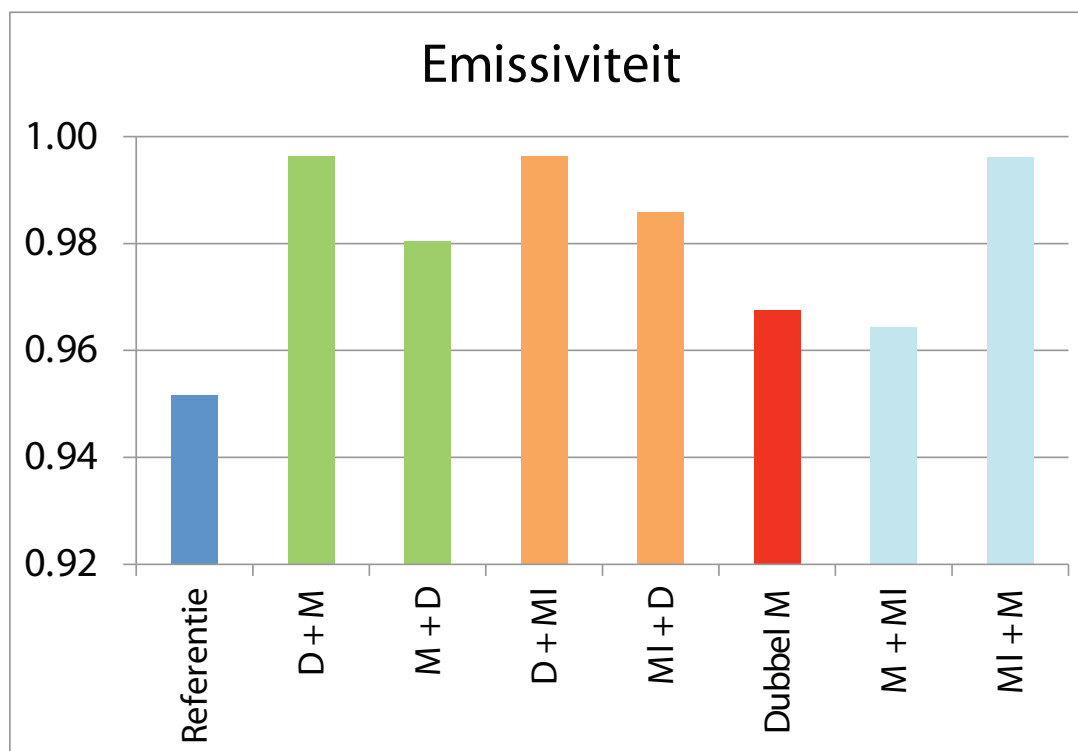
Figuur 41. laat het resultaat zien van contacthoekmetingen aan de samples met microlens, motheye en circulaire diffusor. Te zien is dat de advancing en de receding contacthoeken van de structuren uit de verschillende samples goed overeen komen. De advancing contacthoek is over het algemeen hoog, wat inhoudt dat het oppervlak van het materiaal hydrofoob is. De receding contacthoek is erg laag, wat inhoudt dat de druppel niet makkelijk over het oppervlak van het materiaal kan rollen. Voor de drie onderzochte structuren (in combinatie met de oppervlaktechemie van de lak) betekent dit dat er een hoge contacthoekhysterese is. De combinatie hoge advancing contacthoek en hoge contacthoekhysterese duidt op een Wenzel interactie tussen het oppervlak en de waterdruppel: de waterdruppel maakt de microstructuur volledig nat. De druppels blijven daarom in druppelvorm op het materiaal liggen, maar door de ruwheid van het materiaal zullen de druppels niet van het materiaal afrollen.

Superhydrofobiciteit en een zelfreinigend effect zal daarom met deze structuren (in combinatie met deze lak) niet gerealiseerd kunnen worden. De grote contacthoek die water heeft met het oppervlak van de samples wijst erop dat condens in druppelvorm op het materiaal verschijnt. Druppelvorming zorgt voor een toename van de reflectie, afhankelijk van de contacthoek (Pieters *et al.* 1997; Pollet & Pieters, 2002). De grote contacthoekhysterese zal er wel voor zorgen dat schade door vallende condensdruppels op het gewas niet optreden. Dit is echter niet met metingen onderbouwd. Een verkenning is uitgevoerd naar het opzetten van een meetmethode van de hemisferische transmissie onder condensomstandigheden. Deze methode is beschreven in Bijlage III.



Figuur 41. Advancing en receding contacthoek en contacthoekhysteresis van samples motheye + microlens (1), motheye + diffusor (2) en microlens + diffusor (3).

Figuur 42. geeft de emissiviteit van de gecombineerde samples weer. Het laat zien dat het aanbrengen van een oppervlaktestructuur een toename in de emissiviteit tot gevolg heeft. Hierdoor zal er meer energie nodig zijn om de kas warm te houden in de winter, omdat er meer warmte door het oppervlak heen verloren gaat.



Figuur 42. De emissiviteit neemt toe door het aanbrengen van microstructuren in het oppervlak van het materiaal.

De oriëntatie van het sample heeft nog een kleine invloed op de emissiviteit. Dit betekent dat het aanbrengen van een structuurvorm aan de bovenkant van het materiaal een ander effect heeft dan het aanbrengen van dezelfde structuur op de onderkant van het materiaal.

1.4.2.2.4 Samenvatting technische prestaties

De resultaten voor de hemisferische transmissie worden samengevat in Tabel 1. De dubbelzijdige motheye is de enige combinatie van structuren op beide zijden van het materiaal waarvan een verhoogde hemisferische transmissie ten opzichte van het referentiemateriaal is gemeten. Uit Tabel 1. wordt nogmaals duidelijk dat het niet verstandig is om te werken met de loodrechte transmissie. Een aantal samples geeft een verhoging van de loodrechte transmissie, maar scoort veel slechter voor de hemisferische transmissie, zoals geldt voor de combinatie motheye + microlens en motheye + diffusor. Het aanbrengen van een motheye structuur heeft dus een positief effect op de transmissie van het materiaal, maar er moet een goede andere structuur aan de andere kant van het materiaal zitten om deze verhoging in hemisferische transmissie ook daadwerkelijk te halen (zie dubbelzijdig motheye).

Tabel 1. Overzicht van meetresultaten van onderzochte samples.

Materiaal	Absolute loodrechte transmissie (%)	Verskil met referentie loodrecht (%)	Absolute hemisferische transmissie (%)	Verskil met referentie hemisferisch (%)
Referentie PMMA	92.7	-	85	-
Dubbelzijdig micro-V	84.2	-8.5	78.8	-6.2
Referentie PET	90.3	-	83.6	-
Motheye + microlens	95.5	+5.2	69.1	-14.5
Microlens + motheye	78.4	-11.9	72.1	-11.5
Motheye + diffusor	93.4	+3.1	71.2	-12.4
Diffusor + motheye	89.0	-1.3	73.3	-10.3
Microlens + diffusor	75.2	-15.1	68.4	-15.2
Diffusor + microlens	81.1	-9.2	67.1	-16.5
Dubbelzijdig motheye	98.2	+7.9	90.7	+7.1

1.4.3 Niet-technische bespiegelingen

1.4.3.1 Economische aspecten

1.4.3.1.1 Economische analyse

De micro- en nanogestructureerde kasdekmaterialen zijn van invloed op de teelt:

- Productie: omvang en tijdstip (van invloed op prijs)
- Productkwaliteit: kwaliteits- en prijsniveau
- Energieverbruik: omvang en tijdstip van besparing cq. verbruik
- Teeltarbeid: omvang gerelateerd aan productieniveau.

De technische prestaties, zoals uitgebreid beschreven in Secties 4.1 en 4.2, zijn van invloed op de bovengenoemde factoren:

- Transmissie: met uitzondering van de dubbelzijdige motheye hebben alle onderzochte structuurcombinaties een verlagend effect op de hemisferische transmissie. Groei en productie zullen door de lagere hemisferische transmissie in beginsel lager uitvallen, maar de mate waarin wordt ook door andere effecten bepaald, zoals diffusiteit, vervuiling, energiebalans en condensvorming.

- Diffusiteit: met uitzondering van de dubbelzijdige motheye hebben alle onderzochte structuurcombinaties een hoge haze-waarde (dubbelzijdig micro-V 48%, structuurcombinaties 91-93%). Een hoge haze-waarde heeft een positief effect op de productie. Interessante lichtspreadingpatronen zijn gevonden, maar het effect op plantengroei hiervan zijn nog onbekend.
- Vervuiling: de mate en snelheid van vervuiling van het materiaal is niet bekend.
- Condensvorming: het effect van de structuren op condensvorming is niet bekend. Wel is bekend dat water druppels vormt op het oppervlak, waardoor reflecties toenemen en transmissie afneemt. Als dit ook tijdens condensatie optreedt, heeft dit een verlagend effect op de productie.
- Isolatie waarde: de onderzochte structuurcombinaties laten een lichte verhoging in emissiviteit zien. Dit betekent dat er meer energie nodig is om de kas op temperatuur te houden.

De bovengenoemde effecten van de materialen met micro-V en nanostructuren zijn niet volledig bekend, maar op basis van de hemisferische transmissie zullen de materialen met micro-V structuren naar verwachting negatieve effecten hebben op productie en geldopbrengst. De omvang van de negatieve productie-effecten is niet bekend. Substantiële kostenbesparingen (lees energiebesparingen) zullen nodig zijn om de negatieve productie-effecten of opbrengstreductie te compenseren. De materialen met nanostructuren bieden goede vooruitzichten door de theoretisch hogere hemisferische transmissie van helder materiaal. Echter het effect van de lagere haze op productie is nog niet duidelijk.

Deze effecten worden vervolgens afgewogen tegen de investering en de bijbehorende jaarkosten (afschrijving, onderhoud en rente) van de materialen. De investeringsbedragen (bij marktintroductie) van materialen met micro-V en nanostructuren zijn nog niet vastomlijnd, omdat deze nog in een experimenteel stadium verkeren. Het fabricageproces van de structuren is wel bekend (embossing), zodat een raming van de investeringen mogelijk is. Behalve het materiaal zelf is ook van invloed of het inpassen van het materiaal in de huidige kassystemen goed mogelijk is of dat aanpassingen aan de kassystemen nodig zijn. In het laatste geval zullen de investeringen hoger zijn. Er mag vanuit worden gegaan dat de micro-V en nanostructuren in de gewenste maten kunnen worden geleverd, zodat geen meerinvesteringen zijn te verwachten.

Referentie kasdekmaterialen

De kasdekmaterialen met micro-V en nanostructuren worden in economisch opzicht vergeleken met gehard tuinbouwglas en met diffuus, AR gecoat gehard glas. Diffuus glas staat de laatste tijd sterk in de belangstelling vanwege de positieve effecten op de productie. De investeringen en jaarkosten (afschrijving, onderhoud en rente) van gangbaar tuinbouwglas en diffuus glas zijn in Tabel 2. vermeld.

Tabel 2. Investeringsbedragen en jaarkosten van diverse glastypen voor kassen (€/m²) 1).

Glas type kasdek materiaal	Investering (€/m ²)	Jaarkosten ⁴ (€/m ²)
Tuinbouwglas, niet gehard	3,50	0,35
Tuinbouwglas, gehard ²⁾	6,50-7,00	0,65-0,70
Diffuus en gehard glas ³⁾	11,00-12,00	1,10-1,20
Diffuus, gehard en AR gecoat glas ^{2,3)}	16,00-18,00	1,60-1,80

1. Source: Montero *et al.* 2012. Investeringsbedragen en jaarkosten voor telers.

2. Referentie kasdek materiaal

3. Diffuus glas: type Vetrasol 503, AR coating aan buitenzijde.

4. Jaarkosten: afschrijving (7%), onderhoud (0,5%) en gemiddelde rente (2,5%). Totaal: 10%.

Tabel 2. laat zien dat de investeringen in gehard tuinbouwglas uiteenlopen van 6,50-7,00 €/m² en van 16-18 €/m² voor diffuus, gehard met AR-gecoat glas. De jaarkosten van de verschillende typen glas zijn een factor tien kleiner. De jaarkosten van diffuus, gehard en AR-gecoat glas zijn 0,95-1,10 €/m² hoger dan van gangbaar gehard tuinbouwglas.

De ontwikkelingen met diffuus glas gaan echter snel. Voor meerdere gewassen zijn in proef- en praktijkomstandigheden hogere producties vastgesteld (Janse *et al.* 2012; Dueck *et al.* 2012; Garcia *et al.* 2012). Ook in Middelen gebied

(Almeria, Spanje) worden onder diffuus glas hogere producties in een tomatenteelt bereikt dan onder plastic kasdek materiaal (Pers. comm. J. Janse, WUR Glastuinbouw). Vanwege deze gunstige ontwikkelingen en meerdere aanbieders is de prijs van diffuus glas gedaald. Begin 2013 werden voor gehard, diffuus en dubbelzijdig AR gecoat glas bedragen genoemd van 8-13 €/m² (Praktijkinfo). Dit verschil wordt deels verklaard door het verschil in hazefactor (50% respectievelijk 74%). Ook van gehard blank glas is het prijsniveau gedaald (2-3 €/m²). De additionele investering in diffuus glas ten opzichte van gangbaar gehard glas bedraagt ca. 6-10 €/m². De extra jaarkosten van diffuus glas worden meer dan gecompenseerd door de extra productie (Janse *et al.* 2012; Dueck *et al.* 2012; Garcia *et al.* 2012).

Kasdekmaterialen met micro-V en nanostructuren

De experimenten met micro-V en nanostructuren hebben nog geen bevredigende resultaten t.a.v. transmissie, haze, isolatiegraad, etc. opgeleverd. Wel is met enige voorzichtigheid een schatting gemaakt van de benodigde investeringen en kosten voor de ontwikkelaar van de structuren en de glasproducent, als deze partijen zouden besluiten om de structuren door te ontwikkelen voor praktijkintroductie. De indicatieve investeringen en kosten voor de ontwikkelaar van de micro-V of nanostructuur en voor de glasproducent zijn in Bijlage IV vermeld. Op basis van de kosten voor de glasproducent zijn de investering en de jaarkosten van het glas met micro-V of nanostructuur voor de teler geraamd. In Tabel 3. zijn de voor de teler additionele investeringen en jaarkosten van kasdekmaterialen met micro-V of nanostructuren vermeld.

Tabel 3. Schatting van de additionele investering en jaarkosten van kasdekmaterialen met micro-V of nanostructuren voor de teler (€/m² glasoppervlak 1).

Glas type kasdek materiaal ²⁾	Additionele investering ³⁾ (€/m ²)	Additionele jaarkosten ^{3,4)} (€/m ²)
Micro-V / nano-structuur	9-16	0,9-1,6

1. Source: Info R. Wilde (Nanoptics), bewerkt door WUR Glastuinbouw, 2013.
2. Glas type: Micro-V of nanoo-structuur aangebracht op gehard tuinbouwglas.
3. T.o.v. referentie kasdek materiaal (gehard blank tuinbouwglas)
4. Jaarkosten: afschrijving (7%), onderhoud (0,5%) en gemiddelde rente (2,5%); totaal: 10%.

De in Tabel 3. vermelde schatting van de additionele investering en jaarkosten van micro-V of nanostructuur voor telers laat een grote bandbreedte zien, omdat dit sterk wordt bepaald door de ontwikkelingen en resultaten in het voortraject (bij structuurontwikkelaar en glasproducent). De additionele jaarkosten zijn het richtpunt voor de te behalen voordelen op het terrein van teelt (productie/prijs) en energie(besparing). Vooralsnog zijn er nog geen concrete voordelen van deze kasdekmaterialen, welke de extra kosten deels zouden kunnen compenseren. De additionele investering en jaarkosten van micro-V of nanostructuur ten opzichte van gehard blank glas zijn groter dan die van diffuus, gehard en AR gecoat glas (zie hiervoor). Diffuus, gehard en gecoat glas is op dit moment een interessanter alternatief kasdek voor telers, omdat hier wel voordelen tegenover staan die de extra kosten meer dan compenseren.

Gevoeligheidsanalyse

Willen de kasdekmaterialen met micro-V of nano-structuur überhaupt interessant worden, dan is een meerproductie en/of energiebesparing nodig om de additionele jaarkosten gerelateerd aan de meerinvestering te compenseren (zie Tabel 4.).

Tabel 4. Benodigde meerproductie (%) en benodigde energiebesparing (m³/m² en %) bij trostomaat, roos en Phalaenopsis om de geraamde additionele jaarkosten van micro-V of nano-structuur te compenseren.

Teelt ¹⁾	Benodigde meerproductie (%)	Benodigde energiebesparing (m ³ /m ²) ²⁾	Benodigde energiebesparing (%)
Trostomaat (onbelicht)	2,5-4	3,3-5,9	5-8,5
Roos (Red Naomi)	1-2	3,6-6,4	4-7
Phalaenopsis	0,5-1	3,6-6,4	4,5-8

Bron: Vermeulen, 2013.

1. Voorbeeldgewas groenten, snijbloemen en potplanten. Energievoorziening: ketel en WKK.

2. Commodityprijs: ca. 0,27 €/m³.

Voor de teelt van trostomaat (niet belicht), roos of phalaenopsis is de minimaal benodigde meerproductie 2,5-4%, 1-2% respectievelijk 0,5-1% (zie Tabel 4. en Bijlage V). De kleinere meerproductie voor roos en Phalaenopsis houdt verband met de hoge geldopbrengsten in de referentiesituatie (zie Bijlage V). Bij een jaarkostenpercentage van de investering van 15% (bv. door kortere looptijd en/of meer onderhoud) is de benodigde meerproductie 3,5-6% (trostomaat), 1,5-3% (roos) en 0,5-1% (phalaenopsis). De additionele jaarkosten van kasdek materiaal met micro-V of nanostructuren (zie Tabel 3.) kunnen ook gecompenseerd worden door een energiebesparing van ca. 3,5-6,5 m³/m² (zie Tabel 4.). Voor genoemde teelten bedraagt bij aanwezigheid van een WKK de relatieve energiebesparing 5-8,5% (trostomaat), 4-7% (roos) en 4,5-8% (phalaenopsis). Uit ervaring is bekend dat de productprijs en energieprij (gasprijs) een grote invloed heeft op de meeropbrengsten respectievelijk de besparing van energiekosten. Een hogere productprijs en gasprijs werkt in dat verband positief door in de minimaal te bereiken meerproductie of fysieke energiebesparing.

Bovenstaande cijfers geven slechts een grove indicatie van de minimaal benodigde meerproductie en energiebesparing om de additionele jaarkosten van micro-V of nanostructuur te compenseren. Combinatie van beide effecten kunnen het perspectief mogelijk eerder binnen bereik brengen. Het voorgaande hangt bovenal af van de werkelijke prestaties die met kasdek materialen met micro-V of nanostructuren in proefomstandigheden kunnen worden behaald in een vervolgonderzoek.

1.4.3.2 Toekomstperspectief

Vooralsnog lijkt het erop dat de prestaties van de micro-V materialen niet beantwoorden aan de verwachtingen. De (hemisferische) transmissie is lager dan die van het referentiemateriaal. Daarnaast zijn de effecten op andere punten (vervuiling, isolatie en condensvorming) nog niet bekend. Als gevolg daarvan is er op dit moment (nog) geen economisch perspectief aan te geven. Verdere uitwerking is afhankelijk van de technische verwachtingen over de verbetermogelijkheden.

Voor materialen met nanostructuren lijkt de hogere hemisferische transmissie wel gunstige vooruitzichten te bieden. De ontwikkeling is echter nog in een experimenteel stadium, zodat effecten op energiebalans, condensvorming en vervuiling nog niet bekend zijn. Wel is op basis van de jaarkosten van de materialen indicatief aan te geven of deze kosten op middellange termijn kunnen worden terugverdiend of dat het economisch perspectief verder in de toekomst ligt of zelfs afwezig is. In Tabel 5. is aangegeven hoe het toekomstperspectief er naar verwachting uit ziet voor de kasdek materialen met micro-V en nanostructuren.

Tabel 5. Toekomstperspectief kasdek materialen met micro-V en nanostructuren¹

Glas type	Perspectief MT ²⁾	Perspectief LT ²⁾
Micro-V structuur	-	0
Nano-structuur	0	0/+

1. Op basis van expert beoordeling

2. MT: middellange termijn; LT: lange termijn; +: aanwezig; 0: neutraal; -: afwezig

1.4.4 Sociaalwetenschappelijke aspecten

Drie sociale aspecten zijn bekeken:

- Sociale kenmerken van technische innovaties
- Toekomstverkenning
- Innovatieproces

1.4.4.1 Sociale kenmerken van technische innovaties

De sociale kenmerken van technische of technologische innovaties omvatten onder meer de volgende aspecten: draagvlak onder kassenbouwers en installateurs, afzetmarkt in binnen- en buitenland, mogelijke impact op plantgezondheid en de mens, de arbeidsomstandigheden en de veiligheids- en duurzaamheidsaspecten. De kasdekmaterialen met micro-V of nanostructuren verkeren nog in een experimenteel stadium, waardoor de onderwerpen 'impact op plantgezondheid en de mens', 'arbeidsomstandigheden en veiligheidsaspecten' en 'duurzaamheidsaspecten' nog niet volledig zijn geanalyseerd. Wel zijn aanbevelingen gedaan, waarmee in een mogelijk vervolgotraject aandacht aan kan worden besteed.

Draagvlak onder kassenbouwers en installateurs

Kassenbouwers en installateurs staan in principe positief tegenover innovatieve ontwikkelingen in kasdekmaterialen. Met name als de ontwikkelingen aansluiten bij bestaande productiewijzen of installatiewijzen. In de strategie van deze bedrijven is voorzien dat zij ook rekening houden met technologische vernieuwingen, die een aanpassing van bestaande kassystemen inhouden. Aan de andere kant volgen deze toeleveranciers sterk de wensen en initiatieven van de tuinbouwproducenten (Vermeulen en Poot, 2008). Als tuinbouwproducenten de voordelen van innovaties zien, dan springen toeleveranciers daar snel op in.

Afzetmarkt van de nieuwe materialen in binnen/buitenland

De onderzoeksresultaten met materialen met micro-V of nanostructuren geven nog geen zicht op een gunstig perspectief voor de korte termijn. Hierdoor zijn er op dit moment geen tot geringe marktkansen voor deze materialen in binnen- en buitenland. Materialen met nanostructuren bieden in theorie gunstiger vooruitzichten, maar de praktische toepassing is op korte termijn nog niet te verwachten. Het is te verwachten dat micro-V materiaal - met verbeterde eigenschappen - en materialen met nanostructuren met name toepassing kunnen vinden op productielocaties waarin licht een limiterende productiefactor is en daarnaast de energiebehoefte relatief groot is. Dit betreft gewassen met een relatief hoge lichtbehoefte en een relatief hoge warmtebehoefte, gegeven de lokale klimaatcondities. Deze situaties komen vooral (maar niet alleen) voor in productiegebieden in gematigde klimaatstreken. In een vervolgonderzoek kan dit worden geanalyseerd als de technische en teelt prestaties zijn te kwantificeren. Hierbij kunnen de volgende vragen in overweging worden genomen:

- Zijn de kansen voor toepassing van de micro-V of nanostructuren op hard (glas/plastic) en zacht (plastic) kasdekmateriaal gelijk of verschillen deze? Voor welke toepassing is het perspectief het meest gunstig?
- Is de afzetmarkt vooral in de categorie hightech kassystemen te vinden? Of is een bredere toepassing denkbaar, zoals in midtech kassen? Welke factoren spelen daarbij een rol? (o.a. investeringsmogelijkheden en -bereidheid onder telers)
- Hoe ziet de grondstoffenmarkt er uit en kan dit van invloed zijn op de beschikbaarheid en kwaliteit van het micro-V materiaal of materiaal met nano-structuren?

Overige aspecten

In het onderhavige project zijn enkele aspecten niet bekeken. Het verdient aanbeveling navolgende aspecten en aandachtspunten mee te nemen in een eventueel vervolgonderzoek.

Een van de aspecten betreft de 'impact van de materialen op de plantgezondheid en de mens'. Kunnen er effecten en/of emissies optreden, die van invloed zijn op de gewasconditie of stress-situatie van de plant en/of voor de in de kas werkende mens. Hierbij wordt onder andere gedacht aan een mogelijke spectrale verandering van het licht of emissie van (schadelijke) stoffen uit het materiaal.

Een ander aspect betreft de 'arbeidsomstandigheden en veiligheid'. In hoeverre kunnen de materialen van invloed zijn op de arbeidsomstandigheden en veiligheidssituatie in de kas. Hierbij wordt gedacht aan een verhoogde kans op breukschade

(o.a. hagel, wind), brand, etc. Heeft het vervangen van het nieuwe materiaal na schade mogelijke gevolgen voor de werkwijze en daarmee ook voor de veiligheid van de kassenbouwer en het tuinbouw personeel?

Een derde aspect heeft betrekking op de 'duurzaamheid' van de materialen. Belangrijke aandachtspunten, welke meestal ook standaard door de materiaalproducent en/of kassenbouwers in hun afweging worden betrokken, zijn: technische/economische levensduur, fysische eigenschappen (breekbaarheid, brandbaarheid, vervorming, etc.), chemische eigenschappen (stabiliteit samenstelling, reageerbaarheid met stoffen in kas, zoals gewasbeschermingsmiddelen, etc.), benodigde inputmiddelen (materiaal, energie, water, etc.) en hergebruiksmogelijkheden na toepassing (recyclebaarheid, hergebruik voor andere toepassingen en benodigde input (energie, water, etc.) voor (her)nieuw(d)e toepassing).

Een vierde aspect betreft het onderhoud aan het glasdek. Is coating en in het algemeen, en in dit geval embos-lak in het bijzonder, bestand tegen de standaard schrobmachines die worden gebruikt voor het reinigen van kasdekken. Wordt de levensduur van de lak beïnvloed door het buitenklimaat (regen, hagel, hoge instraling, temperatuurwisselingen)

1.4.4.2 Toekomstverkenningen

In deze paragraaf wordt beknopt ingegaan op de vraag hoe de technologische ontwikkeling met betrekking tot kasbedekkingsmaterialen zich verhoudt tot toekomstige ontwikkeling van de glastuinbouw en haar positie in de maatschappij. Hierna worden enkele trends en ontwikkelingen in de glastuinbouw in een nationale en internationale context vermeld (Bakker *et al.* 2013).

Trends en ontwikkelingen:

De bedekte teelt neemt wereldwijd toe. Grootste toename in Azië (China), Afrika en Zuid-Amerika. Voedselzekerheid en voedselveiligheid zijn belangrijke factoren waarom de bedekte teelt in omvang groeit. Daarnaast is de productiviteit van de bedekte teelt hoger dan van open teelten. Ca. 90% van de bedekte teelt is onder plastic: single tunnel, paral kassen, multi-tunnels, etc. Teelt onder glas komt met name voor in Noord-West Europa. Ook op andere continenten worden steeds meer glazen kassen gebouwd, maar de omvang is nog relatief bescheiden.

Productiegebieden liggen nabij urbane gebieden. Druk op de ruimte neemt daar toe. Als vestigingslocatie is een hoge productiviteit en/of oriëntatie op kwalitatief hoogwaardige producten een economische vereiste. Inkomensontwikkeling is een drijvende kracht voor de vraag naar hoogwaardige producten. Globalisering zet door, maar als tegenstroom ontstaat een groeiende vraag naar local for local. Niet alleen uit chauvinisme, maar ook uit oogpunt van voedselzekerheid en voedselveiligheid. Als gevolg daarvan zetten steeds meer bedrijven nevenvestigingen op dichtbij de afzetmarkt. Soms op verschillende continenten.

Steeds meer landen (Azië, Afrika en Midden-Amerika) willen minder afhankelijk worden van de (dure) import van verse voedingsproducten (groente en fruit). Overheid en bedrijfsleven investeren in het professionaliseren van de kassuinbouw. Duurzame producten en productiewijze worden een minimum vereiste. CO₂ footprint en CO₂-foodmiles helpen consumenten om verantwoorde keuzes te maken.

Het technologie niveau van kassen stijgt. Enerzijds door de ontwikkeling van de kas zelf (constructie, kasdekmaterialen, etc.), maar ook door toepassing van (nieuwe) technologieën in kassen (teeltsystemen, mechanisatie, monitoring, etc.). Hiermee schuift het technologieniveau van low-tech kassen op naar mid-tech kassen en van mid-tech kassen naar hightech kassen. De verdeling van kassen wereldwijd naar technologieniveau vertoont een piramidale vorm (aan de basis low-tech en hightech aan de top).

De hierboven geschetste ontwikkelingen duiden op een toename van de bedekte teelt van m.n. voedingsproducten. Aan de producten en productiewijze zullen wel steeds hogere eisen worden gesteld ten aanzien van duurzaamheid en maatschappelijke acceptatie. De ontwikkeling van micro-V of nanostructuren voor kasdekken sporen met de ontwikkelingen in de glastuinbouw en in de maatschappij. Kasdekken met micro-V of nanostructuren kunnen - mits de voordelen nadrukkelijk worden aangetoond - een bijdrage leveren aan een hogere productiviteit en een zuiniger gebruik van de schaarser worden fossiele grondstoffen. Wel zal de toepassing van micro-V en nano-structuren zeer waarschijnlijk

zich eerder manifesteren bij kassen met een hogere technologiegraad, omdat de additionele investeringen daarin eerder kunnen worden terugverdiend. Een relatief kleine meerproductie leidt tot absoluut hogere geldopbrengsten, omdat het productie en opbrengstenpeil bij high-tech kassen op een hoger niveau ligt (of moet liggen) dan bij mid-tech of low-tech kassen.

De ontwikkelingen in kasdekmaterialen kunnen snel gaan. Dat blijkt uit het feit dat de lichtdoorlatendheid (transmissie) van (diffuus) glas gedurende de looptijd van dit project verder is verbeterd. Daarnaast zijn de investeringskosten in diffuus glas de laatste tijd (sterk) gedaald. Hierdoor moeten kasdekmaterialen met micro-V en nanostructuren nog betere prestaties leveren om een interessant alternatief te worden in de glastuinbouw.

1.4.4.3 Innovatieproces

Voor het slagen van innovaties in de praktijk spelen behalve technisch-economische factoren ook sociaalpsychologische aspecten een rol. Hierbij wordt bedoeld op het krachtenveld en de stakeholderanalyse. Hoe staan partijen in het innovatie- of transitieproces en wat is hun perceptie, houding en gedrag. Dit is in beeld te brengen door middel van monitoring en evaluatie. Daarnaast biedt dit een instrument om het innovatietraject in goede banen te leiden en te houden.

Krachtenveld en stakeholderanalyse

De houding en gedrag van stakeholders bij technologische innovaties kan verschillen naar gelang de positie en het belang die de betreffende stakeholder in het proces heeft. De volgende groepen stakeholders kunnen worden onderscheiden: kennisinstellingen, producent micro-V/nanostructuur, kasdek producent, kassenbouwer, installateur en adviseurs. Stakeholders vertonen hierbij de rol van mover, blocker of floater. Een mover draagt in positieve en stimulerende zin bij aan de ontwikkeling, terwijl blockers een defensieve houding aannemen en als het ware meer op de rem trappen. Floaters vertonen een wisselend gedrag ten aanzien van hun actieve bijdrage aan de innovatie. Het is belangrijk welke partijen welke rol spelen, omdat met movers (en floaters) meer beweging in het innovatieproces is te bereiken. Blockers kunnen in dat opzicht het innovatieproces frustreren.

Monitoring en evaluatie

In het micro-V project is in het begin een bijeenkomst met gebruikers geweest. De bedoeling was om de perceptie, houding en gedrag van de stakeholders in het vervolgtraject te monitoren. De (tussen)resultaten waren geen aanleiding om de gebruikerscommissie daarna bijeen te roepen. Hierdoor zijn geen resultaten te melden wat betreft houding en gedrag van relevante belanghebbenden ten aanzien van het perspectief van de micro-V en nano-structuren op kasdekmaterialen. Bij een eventueel vervolgonderzoek wordt aanbevolen de monitoring en evaluatie wel uit te voeren. In overleg met de begeleidingscommissie is besloten ter afsluiting van het project een workshop te houden met relevante partijen uit de kasindustrie en PV-industrie. Doel van de workshop is het verspreiden en delen van de kennis uit dit project en het nut van vervolgacties na te gaan.

1.5 Toepassing

Hoewel de onderzochte micro- en nanostructuren nog niet beter presteren dan de huidig beschikbare materialen, zullen ontwikkelingen op het gebied van structurering innovaties in de toekomst mogelijk maken in de glastuinbouw. Toepassing op korte termijn zal daarom dan ook niet plaatsvinden. De onderzochte structuren zorgen wel voor een volledig ander spreidingspatroon van het doorgelaten licht dan de huidige beschikbare materialen. Momenteel wordt door Wageningen UR Glastuinbouw onderzoek gedaan naar het effect van lichtspreading op de gewasgroei en de productie.

Structuren zijn in eerste instantie onderzocht voor toepassing als kasdek materiaal. De toepassing komt in beeld bij nieuwbouw van een glastuinbouwbedrijf, maar kan ook bij verdedken rendabel zijn, mits de eigenschappen van het nieuwe kasdek voldoende financiële voordelen bieden (Ruijs *et al.* 2012).

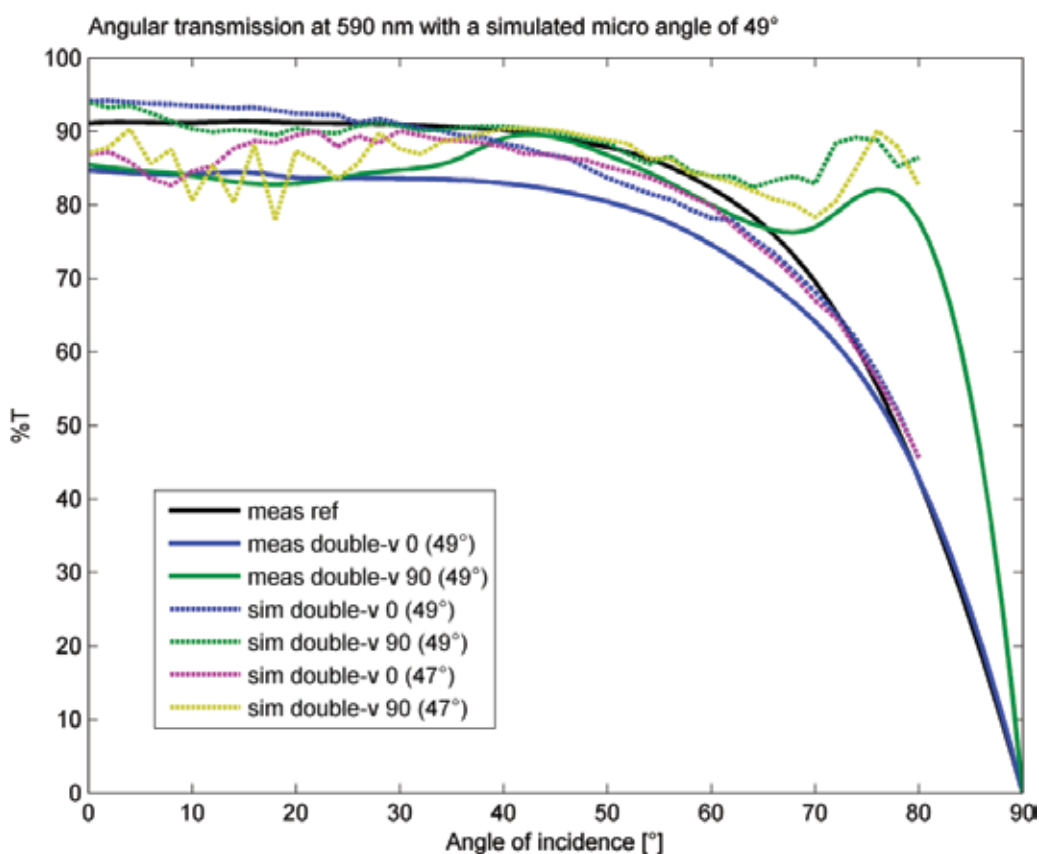
De glasfabrikanten voegen waarde toe aan hun product door extra functionaliteit te creëren door structuren aan te

brengen. De meest logische plek voor het aanbrengen van de structuren is in het productieproces van het glas. Hiervoor zou een machine aan het productieproces moeten worden toegevoegd. De afgekoelde glasplaat rolt door de toegevoegde machine, waar een laklaag op wordt aangebracht. De structuur wordt in de laklaag gedrukt, waarna het wordt uitgehard met UV-licht. De plaat is nu direct gebruiksklaar voor de eindklant.

Hoog transparante structuren zouden ook kunnen worden toegepast op bijvoorbeeld schermmateriaal. Door isolatieschermen meer transparant te maken, kan in de winter de isolatiewaarde van de kas verhoogd worden, terwijl er minder licht verloren gaat. Ook tijdelijke folies die in de winter gebruikt worden om de isolatiewaarde te verhogen kunnen met structuren worden uitgerust om de transmissie te verhogen.

1.6 Discussie

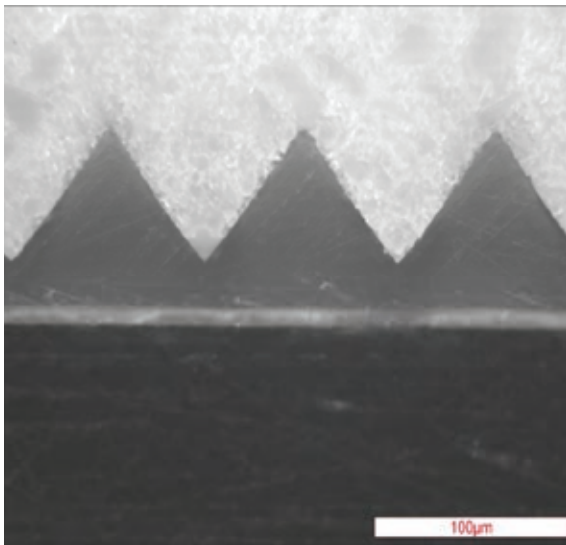
In de resultatensectie van het rapport is een verschil te zien tussen de gemeten en de gesimuleerde lichttransmissie. Er zijn een aantal mogelijke oorzaken aan te wijzen voor deze verschillen. De eerste mogelijkheid is dat de microhoek van het geproduceerde sample niet precies 49° is. Figuur 43. laat de resultaten van een simulatie zien waarbij een microhoek van 49° (gemeten en gesimuleerd) is vergeleken met een microhoek van 47° . Het is opvallend dat de waarden voor een gesimuleerde microhoek van 47° veel dichter bij de gemeten waarden van het dubbelzijdig gestructureerde materiaal liggen dan die van 49° . Echter, bij een controle van de microhoek van het gemeten sample door het maken van een Foto van een doorsnede van het materiaal met een scanning electron microscope (SEM), is geconstateerd dat de hoek echt 49° is (zie Figuur 44.).



Figuur 43. Gemeten hoekafhankelijke transmissie van micro-V structuur vergeleken met de gesimuleerde waarden bij microhoeken van 47° en 49° .

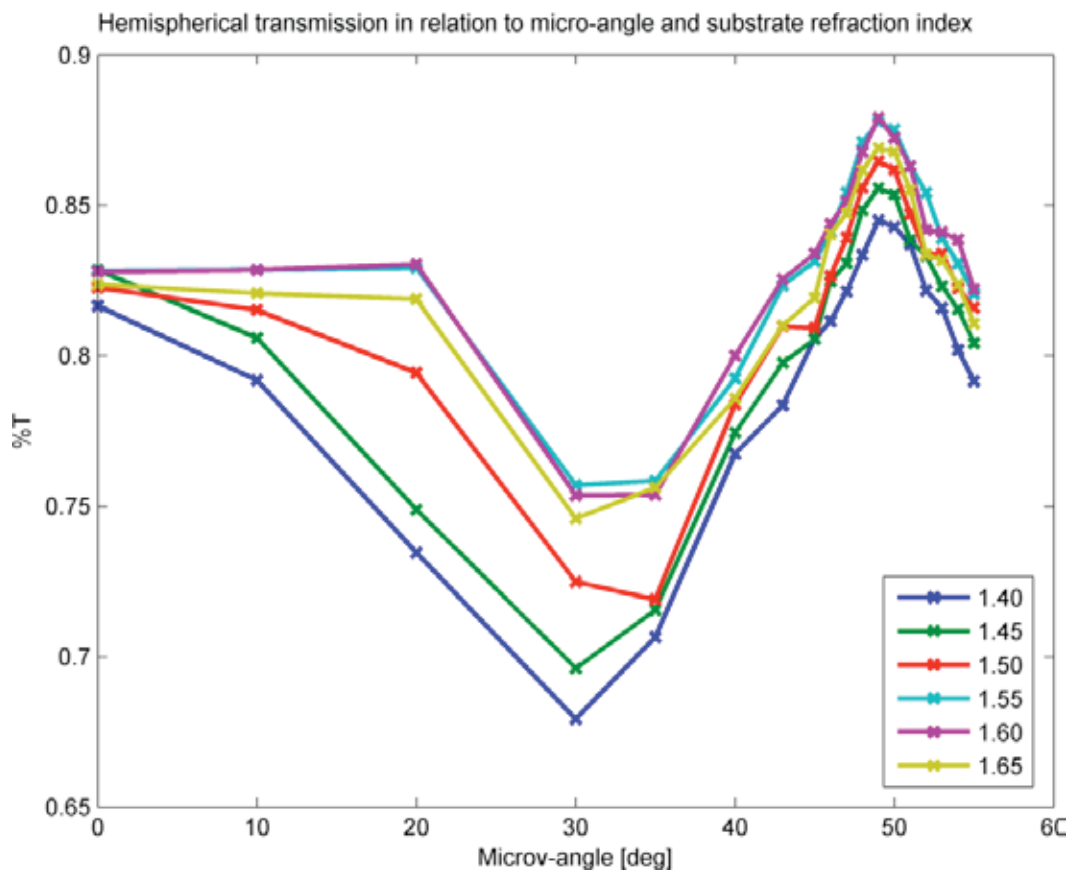
Uit deze Foto komt mogelijk een tweede oorzaak van een verschil naar voren: tussen de laklaag en het substraatmateriaal ligt nog een dun laagje van een primer, die ervoor moet zorgen dat de lak aan het materiaal hecht. De optische eigenschappen van deze primer zijn niet bekend, zodat er geen simulaties uitgevoerd kunnen worden naar het effect van

deze laag. De verwachting is echter dat dit effect niet groot genoeg zal zijn om het verschil te kunnen verklaren, omdat de laag erg dun is (5-7 μ m).



Figuur 44. SEM-Foto van de micro-V structuur, waarin duidelijk het dragermateriaal, primer en laklaag te zien zijn, met daarin aangebracht een scherpe micro-V structuur. Op basis van deze Foto is de hoek van het gemaakte materiaal bepaald (Bron N. Kuijpers, Matinspired).

Een derde mogelijkheid is dat de brekingsindex van de lak afwijkt van de brekingsindex van het substraatmateriaal (PMMA). In Figuur 45. is weergegeven dat de brekingsindex een behoorlijk effect kan hebben op de transmissie van een sample. Dit is echter alleen nagegaan voor een sample zonder lak, maar dit geeft wel aan dat hier een mogelijk effect zit. Er is een verschil van 4% tussen een brekingsindex van 1.40 en 1.60.



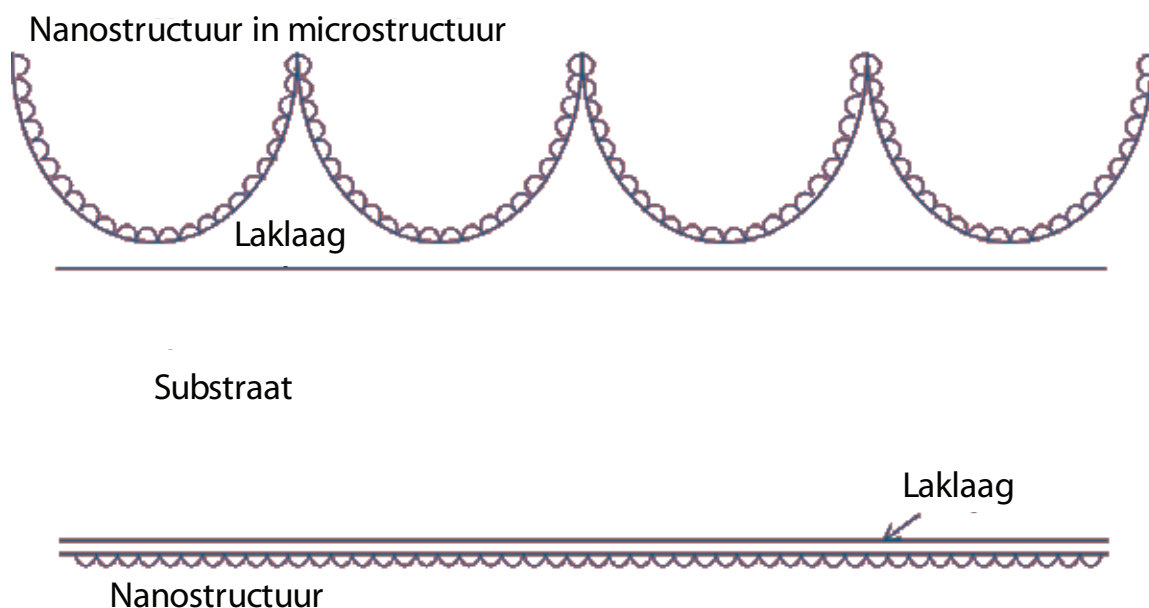
Figuur 45. Optimalisatie van microhoek bij verschillende brekingsindices van het substraatmateriaal. De brekingsindex heeft een effect op de transmissie van het sample.

Een vierde mogelijkheid tot het optreden van een verschil tussen gesimuleerde waarden en gemeten waarden zit in de simulatiemethode. Doordat een oneindig repeterende microstructuur wordt gesimuleerd, worden alle lichtstralen ofwel tot transmissie gerekend, ofwel tot reflectie. Bij de metingen is er nog een derde optie, namelijk het licht verlaat het sample aan de zijkant. Dit blijkt in de praktijk ook te gebeuren. Een deel van het licht dat het sample aan de zijkant verlaat wordt bij de simulatie bij de transmissie opgeteld, terwijl dit bij de metingen niet het geval is. Hoe groot het verschil is dat hierbij optreedt is niet kwantificeerbaar.

Een laatste mogelijkheid is dat het oppervlak van het geproduceerde sample optisch niet perfect is. Dit vermindert het theoretische effect dat de structuur moet hebben, doordat reflecties op het oppervlak niet de goede richting op geleid worden en niet in de richting van transmissie gestuurd worden. Wederom is het niet mogelijk om dit effect te kwantificeren. Wanneer dit het geval is, zou dit betekenen dat de productiemethode die gekozen is wellicht niet geschikt is.

Het warm embossen van microstructuren in glas is tijdens dit onderzoek niet mogelijk gebleken. De methode zou wel geschikt kunnen zijn voor het aanbrengen van microstructuren direct in plastic (bijv. polycarbonaat (PC) of polymethyl methacrylaat (PMMA)). Dit is echter niet verder onderzocht, omdat plastic als kasdek materiaal nauwelijks wordt toegepast in de Nederlandse glastuinbouwsector. Wanneer de structuren in PC veel betere resultaten laten zien dan het huidige beschikbare kasdek materiaal, dan zou het ook voor Nederlandse telers interessant kunnen zijn om over te stappen van glas naar PC met microstructuren.

Een mogelijkheid die in vervolgonderzoek opgepakt kan worden is het aanbrengen van nanostructuren in microstructuren (zie Figuur 46.). Dit zou de transmissie van samples met microstructuren kunnen verbeteren, terwijl tegelijkertijd de diffusie behouden blijft.



Figuur 46. Het aanbrengen van een nanostructuur in een microstructuur zou een verhoging in de hemisferische transmissie kunnen geven, met behoud van diffusiteit.

1.7 Conclusies en Realisaties

Doel van het project was het ontwikkelen van een ultra-energiezuinig kassysteem door het toepassen van super transparant diffuus kasdek materiaal. Door middel van het aanbrengen van micro- en nanostructuren op transparant materiaal is geprobeerd een kasdek te ontwikkelen met een hoge hemisferische transmissie en een diffuse uitstraling. De onderzochte structuren waren veelal afkomstig uit de PV-industrie.

1.7.1 Conclusies

Een verkleining van de in het verleden ontwikkelde zigzagstructuur naar een micro-V groef van $100\mu\text{m}$ en een hoek van 49° leverde in simulaties een verhoging in de hemisferische transmissie van 5% ten opzichte van het vlakke uitgangsmateriaal op. Een kleine afwijking van deze hoek in het dubbelzijdig gestructureerde materiaal zorgde voor een verlaging in de transmissie. Verschillende configuraties micropiramides hadden geen verhoging van de transmissie tot gevolg.

De best beschikbare methode om op grote schaal structuren aan te brengen op glas, is het aanbrengen van een laklaag waarin een structuur gedrukt wordt, die wordt uitgehard met UV-licht. Direct aanbrengen in het glas is geen optie omdat het niet direct in het huidige productieproces kan worden toegepast. Opnieuw opwarmen van het materiaal tot een temperatuur waarop het vervormd kan worden kost meer energie dan het in de kas aan energiebesparing oplevert. Bovendien vermindert het aanbrengen van een V-groef in het materiaal de sterkte. De geselecteerde methode kan snel grote oppervlakken produceren, waardoor het een interessante methode is om kasdek materiaal te produceren. Voor toepassing in de glastuinbouw moet de laklaag nog verder ontwikkeld worden. De kwaliteit van overbrenging van microstructuren heeft een groot effect op de transmissie van het materiaal, waardoor het erg belangrijk is de structuur goed in het materiaal over te brengen. Dit is een mogelijke oorzaak voor het niet vinden van een microstructuur met een verhoogde hemisferische transmissie in de metingen.

Structuren die kleiner zijn dan de golflengten van licht hebben in berekeningen en metingen aangetoond een verhoging van de hemisferische transmissie te kunnen bewerkstelligen. Metingen aan dubbelzijdig toegepaste motheye-structuren laten een verhoging van 7% zien ten opzichte van het vlakke uitgangsmateriaal. Hiermee wordt een hemisferische transmissie van 90% gehaald. Berekeningen hebben aangetoond dat in theorie transmissies tot 99% mogelijk zijn met structuren kleiner dan de golflengte van licht, maar er is niet onderzocht of deze structuren ook praktisch maakbaar zijn. Nadeel van deze zeer kleine structuren voor toepassing in kasdek materiaal is dat het licht niet diffuus gemaakt wordt.

Er is geprobeerd combinaties te maken van micro- en nanostructuren, om toch een diffuus materiaal met een hoge transmissie te maken. De microstructuren moeten zorgen voor een diffuse uitstraling, terwijl ze de transmissie niet verlagen. Hier zijn structuren uit de PV-industrie toegepast, die hebben bewezen het rendement van zonnecellen te kunnen verhogen. Combinatie van motheye aan de bovenzijde van het materiaal met een microlens of een circulaire diffusor laten de grootste potentie zien, maar halen nog niet de transmissie van het vlakke uitgangsmateriaal. Bij kleine afwijking van loodrechte lichtinval (tot ongeveer 30° , hoek tussen de normaal en de invallende lichtstraal) verhogen deze materialen de transmissie, maar bij grotere hoeken van inval wordt veel terrein verloren ten opzichte van het vlakke uitgangsmateriaal. In het vervolg zal gezocht moeten worden naar een structuur die het licht diffuus maakt zonder hierbij te zorgen voor grote verliezen in transmissie. Misschien moet hier gedacht worden aan structuren die ongeveer de afmeting van de golflengte van het licht hebben (400nm - $5\mu\text{m}$). Deze structuren zorgen voor een spreiding van het licht door diffractie, maar verliezen wellicht minder licht. Een andere optie is het aanbrengen van nanostructuren in microstructuren (Figuur 46.).

Contacthoekmetingen aan het gestructureerde materiaal hebben laten zien dat een zelfreinigend effect niet optreedt bij geselecteerde structuren. Het materiaal is hydrofoob (grote contacthoek), maar houdt de druppels vast op het oppervlak (grote contacthoekhysterese). Dit heeft ook tot gevolg dat condens in druppelvorm op het materiaal komt te liggen, waardoor een transmissie verlies optreedt. De hoge contacthoekhysterese zorgt er mogelijk voor dat er geen druppels op het gewas zullen vallen. De isolatiewaarde van het materiaal vermindert door het aanbrengen van structuren, aangetoond door het uitvoeren van emissiviteitsberekeningen.

Tijdens het uitvoeren van het project is in overleg met de partners en financiers besloten het effect van het materiaal op de productie van planten in een kas niet via onderzoek in dit project uit te werken, omdat in het project geen materiaal is ontwikkeld dat deze testen rechtvaardigt. Ook het effect op het klimaat is om dezelfde reden niet getest.

Economische aspecten

- o De economische waardering van de technische prestaties van de kasdekmaterialen met micro-V of nano-structuren is niet mogelijk, omdat de effecten op het teeltniveau niet bekend zijn.

- o De additionele investeringen in micro-V of nano-structuren voor telers worden globaal geraamd op 9-16 €/m² en resulteren in additionele jaarkosten van 0,9-1,6 €/m² t.o.v. van een kasdek met gehard transparant glas.
- o De geraamde additionele jaarkosten van de investering in micro-V of nano-structuur zijn mogelijk te compenseren door een meerproductie en/of energiebesparing. Minimaal is of een meerproductie benodigd van 2,5-4% voor trostomaat, 1-2% voor roos en 0,5-1% voor phalaenopsis of een jaarlijkse energiebesparing van minimaal 3,5-6,5 m³/m².
- o Kasdekmaterialen met micro-V of nano-structuur kunnen mogelijk op langere termijn een interessant alternatief worden, mits duidelijke (teelt)technische en economische voordelen worden gerealiseerd.
- o Op dit moment is diffuus, gehard en AR gecoat glas een economisch interessant alternatief voor gangbaar gehard glas, omdat de additionele jaarkosten meer dan goed worden gemaakt door de productieverhoging. Dit betekent een extra opgave om de prestaties van micro-V en nano gestructureerde materialen te verbeteren.
- o *Ondanks de wat tegenvallende resultaten verdient het aanbeveling de ontwikkeling van micro of nano-structuren een vervolg te geven. De additionele investeringen en de minimaal benodigde meerproductie en/of energiebesparing zijn van een zodanig niveau, dat het economisch perspectief op langere termijn binnen bereik kan komen. Hierbij dient het vervolg zich op de meest veelbelovende micro of nano-structuren te richten.*

Sociale aspecten

- o De ontwikkeling van nieuwe kasdekmaterialen past in het innovatiebeleid van kassenbouwers en zal voldoende draagvlak vinden. Deze ontwikkeling spoort ook met de ontwikkelingen en trends in de glastuinbouw en de maatschappij. Voedselzekerheid en -veiligheid en duurzame productie zijn daarin belangrijke thema's. Innovatieve kasdekken kunnen daaraan een positieve bijdrage leveren door het verhogen van de productiviteit en het zuiniger gebruik van fossiele grondstoffen.
- o De afzetmarkt van nieuwe kasdekmaterialen ligt met name op productielocaties waar licht en energie limiterende productiefactoren zijn (op jaar, periode of zelfs dag-niveau). Hightech en mid-tech kassen komen daarbij het eerste in beeld.
- o *Bij een vervolg verdient het aanbeveling naast de technische prestatie op de teelt de aandacht ook te richten op de effecten van de materialen op de plantgezondheid en de mens, op de arbeidsomstandigheden en veiligheid en op de duurzaamheidsaspecten.*

In een vervolg is de slaagkans op praktijkintroduktie en -toepassing van micro-V of nano-structuren te vergroten door een monitoring en evaluatie traject op te nemen. Hiermee is het innovatietraject met betrokken partijen in goede banen te houden.

1.7.2 Realisaties

Binnen het project 'Ultra-energiezuinige Kassystemen met Supertransparante Micro-V gestructureerde materialen' hebben een aantal publicaties plaatsgevonden, zijn presentaties gegeven en zijn bijeenkomsten bezocht:

Octrooi:

- P.J. Sonneveld Ned. Octrooi aanvraag 1025191, Internationale aanvraag WO 2005/066552 A1
- Publicaties:
- M.M. de Jong, J.K. Rath, R.E.I. Schropp, P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, Geometric Light Confinement in micro-Structured a-Si Thin Film Solar Cells, 26th EUPC conference, Hamburg September 2011.
- J.P.M. van Ruijven, V. Mohammadkhani, H.J. Holterman, R. Herre, V. Boerner, G.L.A.M. Swinkels, Th. H. Gieling, Effect of Micro- and Nanostructures on Optical Performance of Greenhouse Cover Materials, Poster presentation ISHS Lightsym (2012), 7th International Symposium on Light in Horticultural Systems, 15-18 October 2012, Wageningen in The Netherlands
- Onderzoek naar structuur in kasdek materiaal, Onder Glas Juni 2013
- Pitchpresentatie bijeenkomst Climate Adaptive glastuinbouw 28-05-2013 (Micro- and nanostructuring cover materials)
- G.L.A.M. Swinkels, P.J. Sonneveld, H.J. Holterman, Improvement of Light Transmittance of Greenhouse Covering Materials using Microstructures, ISHS Greensys (2010), International conference on Agricultural Engineering, Ref430, 6-8 september 2010, Clermont-Ferrand (France)
- Nieuwe methoden ontwikkeld binnen het project:

- Een productiemethode is ontwikkeld om micro- en nanostructuren op een oppervlak aan te kunnen brengen. De methode is gemakkelijk opschaalbaar naar grote oppervlakken.
- Een nieuwe methode is ontwikkeld om de lichtspreading door transparant materiaal heen te kunnen bepalen. Deze methode geeft nieuw inzicht in het effect van diffuus licht op plantgroei.

1.8 Referenties

Ahn H., Guo J., 2009.

Large-area Roll-to-Roll and Roll-to plate Nanoimprint Lithography.
ACS Nano 3 (8): 2304-2310

Augustin W., Bode K., Scholl S., Lucas N., Büttgenbach S., 2007.

Influence of microstructures on convective heat transfer under laminar and turbulent flow conditions.
Nanoscale and microscale thermophysical engineering, 11 (1-2): 43-55

Bakker J.C., De Groot N.S.P., Campen J.B., Ruijs M.N.A., 2013.

Trends in greenhouse horticulture.
Report GTB (Confidential), WUR Greenhouse Horticulture and LEI Wageningen UR, Bleiswijk.

Belloy E., Sayah A., Gijs M.A.M., 2000.

Powder blasting for three-dimensional micro-structuring of glass.
Sensors and Actuators A: Physics 86 (3): 231-237

Bhushan B., Nosonovsky M., 2010.

The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity.
Philosophical transactions A: Mathematical, physical and engineering sciences 368 (1929): 4713-4728

Bhushan B., Jung Y.C., 2011.

Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction.
Progress in Materials Science 56: 1-108

Bico J., Marzolin C., Quere D., 1999.

Pearl drops.
Europhysics Letters, 47 (2): 220-226

Boerner V., Abbott S., Bläsi B., Gombert A., Hoßfeld W., 2003.

Holographic antiglare and antireflection films for flat panel displays.
Society for Information Displays, conference paper, ISSN/0003-0966X/03/3401-0068

Chattopadhyay S., Huang Y.F., Jen Y.J., Ganguly A., Chen K.H., Chen L.C., 2010

Anti-reflecting and photonic nanostructures
Materials Science and Engineering R 69: 1-35

Chen Y., Elshobaki M., Ye Z., Park J.M., Noack M.A., Ho K.M., Chaudhary S., 2013.

Microlens array induced light absorption enhancement in polymer solar cells.
Physical Chemistry Chemical Physics, 15 (12): 4297-4302

Choy T.C., 1999.

Effective Medium Theory: Principles and Applications.
Oxford University Press: ISBN 0 19 8518907

Cockshull K.E., Graves C.J., Cave C.R.J., 1992.

The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes

Journal of Horticultural Science 67 (1): 11-24

De Jong M., proefschrift, 2013.

Light trapping in Thin Film Silicon Solar Cells on Plastic Substrate

Universiteit Utrecht

Dewan R., Marinkovic M., Noriega R., Phadke S., Salleo A., and Knipp D., 2009.

Light trapping in thin-film silicon solar cells with submicron surface texture.

Optics Express, 17 (25): 23058-23065

Dueck T., Janse J., Kempkes F., Li T., Elings A., Hemming S., 2012.

Diffuus licht bij tomaat.

Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Rapport GTB-1158.

Escarré J., Söderström K., Battaglia C., Haug F.J., Ballif C., 2011.

High fidelity transfer of nanometric random textures by UV embossing for thin film solar cells applications.

Solar Energy Materials & Solar Cells, 95: 881-886

Garcia Victoria, N., Kempkes, F.L.K., Van Weel, P.A., Stanghellini, C., Dueck, T.A., Bruins, M.A., 2012.

Effect of a diffuse glass greenhouse cover on rose production and quality.

Proceedings of the International Symposium on Advanced Technologies and Management towards Sustainable Greenhouse Ecosystems, Greensys2011. - Acta Horticulturae I. - p. 241 - 248. Leuven: ISHS, (952) - p. 241 - 248. Greensys2011, 2011-06-05/ 2010-06-10

Gombert A., Rose K., Heinzl A., Horbelt A., Zanke C., Bläsi B., Wittwer V., 1998a.

Antireflective submicrometer surface-relief gratings for solar applications.

Solar Energy Materials and Solar Cells 54: 333-342

Gombert A., Glaubitt W., Rose K., Dreiholz J., Zanke C., Bläsi B., Heinzl A., Horbelt W., Sporn D., Döll W., Wittwer V., Luther J. 1998b.

Glazing with very high solar transmittance. Solar Energy 62 (3): 177-188.

Goodyear J.K., Lindberg V.L., 1980.

Low absorption float glass for back surface solar reflectors.

Solar Energy Materials, 3 (1-2): 57-67

Heckele M., Bacher W., Müller K.D., 1998.

Hot embossing - The molding technique for plastic microstructures.

Microsystem technologies 4 (3): 122-124

Hemming S., Kempkes F., Mohammadkhani V., Stanghellini C., Swinkels G.J., Holterman H.J., 2006.

Anti-reflectiecoating voor tuinbouwglas: eerste praktijkervaring

Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Rapport 130.

Hemming S., Jongschaap R., Janse J., Dueck T., 2007a.

Effecten van diffuus licht op komkommer. Resultaten van een teelt experiment.

Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Nota 446.

Hemming S., Van Noort F., Hemming J., Dueck T., 2007b.

Effecten van diffuus licht bij potplanten. Resultaten van een teeltexperiment.

Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Nota 454.

Janse J., Moerenhout S., Kempkes F.L.K., Dueck T.A., 2012.

Vroege komkommerteelt onder diffuus glas.

Rapporten

GTB

1183,

Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk.

Kempkes F., Janse J., 2013.

Praktijkervaringen met de Venlow energy kas 2010 -2012

Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. In press.

Kempkes F., Van Os E., 2006.

Gewasgroei en energiegebruik in kassen onder een Lexan-ZigZag kasdek in vergelijking met verschillende soorten kasdekken. Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Nota 428.

Kim Y.T., Lee W.W., Koo K.M., and Lee S.D., 2009.

Wide Viewing Liquid Crystal Displays with Bi-level Surface Microstructures Fabricated by an Imprinting Method.

Molecular Crystals and Liquid Crystals, 507 (1): 245-252

Lalanne P., Hutley M., 2003.

The optical properties of artificial media structured at a subwavelength scale.

Encyclopedia of Optical Engineering

Liu K., Jiang L., 2012.

Bio-inspired Self-cleaning Surfaces.

Annual Review of Materials Research, 42: 231-263

Marcelis L., Broekhuijsen G., Meinen E., Nijs L., Raaphorst M., 2004.

Lichtregel in de tuinbouw: 1% licht = 1% productie?

Plant Research International B.V., Wageningen. Nota 305

Ministerie LNV, 2008.

Convenant Schone en Zuinige Agrosectoren

Montero J.I., Antón A., Torrellas M., Ruijs M.N.A., 2012.

Report on economic & environmental profile of new technology greenhouses at the three scenarios.

Del. 13, Project: KBBE- 2007-1-2-04, IRTA and WUR Greenhouse Horticulture.

Nieto D., Arines J., Gomez-Reino C., O'Connor G.M., Flores-Arias M.T., 2011

Fabrication and characterization of microlens arrays on soda-lime glass using a combination of laser direct-write and thermal reflow techniques Journal of Applied Physics 110 (2)

Nieto D., Vara G., Diez J.A., O'Connor G.M., Arines J., Gómez-Reino C., Flores-Arias M.T., 2012.

Laser-based microstructuring of surfaces using low-cost microlens arrays

Journal of micro/nanolithography, MEMS, and MOEMS 11 (2)

Pieters J. G., Deltour J., Debruyckere M., 1997.

Light transmission through condensation on glass and polyethylene.

Agricultural and Forest Meteorology, 85: 51-62

Pollet I.V., Pieters J.G., 2002.

Forward scattering induced by water drops on a transmissive substrate.

Applied Optics 41: 5122-5129.

Programma Kas als Energiebron, 2011.
www.kasalsenergiebron.nl

Ruigrok, J. Swinkels G.L.A.M., 2008.
Lichtmeetprotocol Kasdekmaterialen (protocol for measuring the optical properties of greenhouse covering materials).
TNO & Wageningen UR Greenhouse Horticulture report in order of the Dutch Product Board for Horticulture and the Dutch ministry of agriculture nature and food quality

Ruijs M.N.A., Smit P.X., Jukema G.D., 2012.
Kassen verdekken biedt perspectief.
LEI-rapport 2012-040.

Ruijs M., 2012
Potential investment capacity of micro-V coverings in greenhouse structures.
Presentatie Werkgroep Micro-V, Philips, Eindhoven, 2 juli 2012.

Schmidt B.G., Van de Hey J.R., Zadrazil J.M., Yock E.J., 2005.
Method for embossing air-laid webs using laser engraved heated embossing rolls.
United States Patent 6893525 (<http://www.freepatentsonline.com/6893525.html>)

Sonneveld P.J., Breuer J.J.G., Campen J.B., Swinkels G.L.A.M., en Waaijberg D., 2001.
Ontwikkeling van een Hoog Isolerend Zigzag-vormig Kasdek met een
Geoptimaliseerde Lichttransmissie, Nota P2001-88, september 2001,
IMAG B.V.

Sonneveld P.J., Waaijberg D., Paassen R.A.F. van, Woerden S.C van, 2002.
Innovatieve Energiezuinige Kas met Geoptimaliseerde Zigzag-vormige Kunststofplaten.
Nota P2002-46, september 2002,
IMAG B.V. Wageningen

Southwell W.H., 1991.
Pyramid-array surface-relief structures producing antireflection index matching on optical surfaces.
Journal of the Optics Society of America, A 8 (3): 549-553.

Spencer G.H., Murty M.V.R.K., 1962.
General Ray-Tracing Procedure.
Journal of the Optical Society of America 52 (6): 672-676

Stanghellini C., Mohammadkhani V., Bruins M.A., Hemming S., Sonneveld P., Swinkels G.J., 2010.
Condensatie tegen het kasdek: licht- en energie-effecten van condensatie op acht kasdekmaterialen.
Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Rapport GTB-1025.

Stoffers J.A., 1968
Licht en dekhelling van warenhuizen.
Wageningen, 1968

Van Ruijven J.P.M., Mohammadkhani V., Swinkels G.L.A.M., 2012.
Verkenning mogelijkheden 3D-hazemetingen.
Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen. Rapport GTB-1194.

Vermeulen T., Poot E.H., 2008.
Transitie en toeleveranciers.
Nota 533, Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk, pp. 24 + bijlagen.

Vermeulen P.C.M. (red), 2012-2013.
Kwantitatieve informatie voor de Glastuinbouw; Kengetallen voor Groenten - Snijbloemen - Potplanten teelten.
Rapport GTB-5032.
Wageningen UR Glastuinbouw, Bleiswijk, 2013.

Wang K.X., Yu Z., Liu V., Cui Y., Fan S., 2012
Absorption Enhancement in Ultrathin Crystalline Silicon Solar Cells with Antireflection and Light-Trapping Nanocone Gratings. *Nano Letters*, 12 (3): 1616-1619

Wilson S.J., Hutley M.C., 1982.
The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces.
Optica Acta 19 (7): 993-1009

Yeo C.I., Kwon J.H., Jang S.J., Lee Y.T., 2012.
Antireflective disordered subwavelength structure on GaAs using spin-coated Ag ink mask.
Optics Express, 20 (17): 19554-19562

Zhong Y., Jacobi A.M., Georgiadis J.G., 2006.
Condensation and Wetting Behavior on Surfaces with Microstructures: Super-Hydrophobic and Super-Hydrophilic.
International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 17-20

Internet:
Aquamarijn Micro Filtration
<http://www.aquamarijn.nl/>
Bezocht: 26-06-2013

C-coatings
<http://www.c-coatings.com/>
Bezocht: 26-06-2013

Fluke Corporation
http://support.fluke.com/calibration-sales/Download/Asset/9010104_ENG_A_W.PDF
Bezocht: 24-06-2013

Horti-trade
<http://www.horti-trade.com/images/generic/drawing/kasdek.jpg>
Bezocht: 24-06-2013

Klimaatwebsite België
http://www.klimaatwebsite.be/klimaat/MAP.php?p=BE/BE_09&m=BE/M01
Bezocht: 24-06-2013

Kruss

<http://www.kruss.de/en/products/contact-angle/predecessors.html>

Bezocht: 24-06-2013

Memsnet

<http://www.memsnet.org/mems/fabrication.html>

Bezocht: 24-06-2013

Nanoptics

<http://www.nanoptics.de/Nanoptics/Home.html>

Bezocht: 26-06-2013

OM&T

<http://www.om-t.net/>

Bezocht: 26-06-2013

PerkinElmer

<http://www.perkinelmer.com/nl/Catalog/Category/ID/Integrating%20Spheres>

Bezocht: 24-06-2013

Physicsworld

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2009/feb/09/moth-eyes-inspire-more-efficient-solar-cell>

Bezocht: 24-06-2013

Pulles&Hanique

<http://www.pulleshanique.com/>

Bezocht: 26-06-2013

Radiant Zemax

<http://radiantzemax.com/measurement-systems/imaging-sphere/is-sa>

Bezocht: 24-06-2013

Ramehart

http://www.ramehart.com/newsletters/2008-09_news.htm en <http://www.ramehart.com/glossary.htm>

Bezocht: 24-06-2013

US Patent US6422920

<http://www.google.com/patents/US6422920>

Bezocht: 24-06-2013

VarianFTIR

<http://varianftirchem.com/pdf/si-1335.pdf>

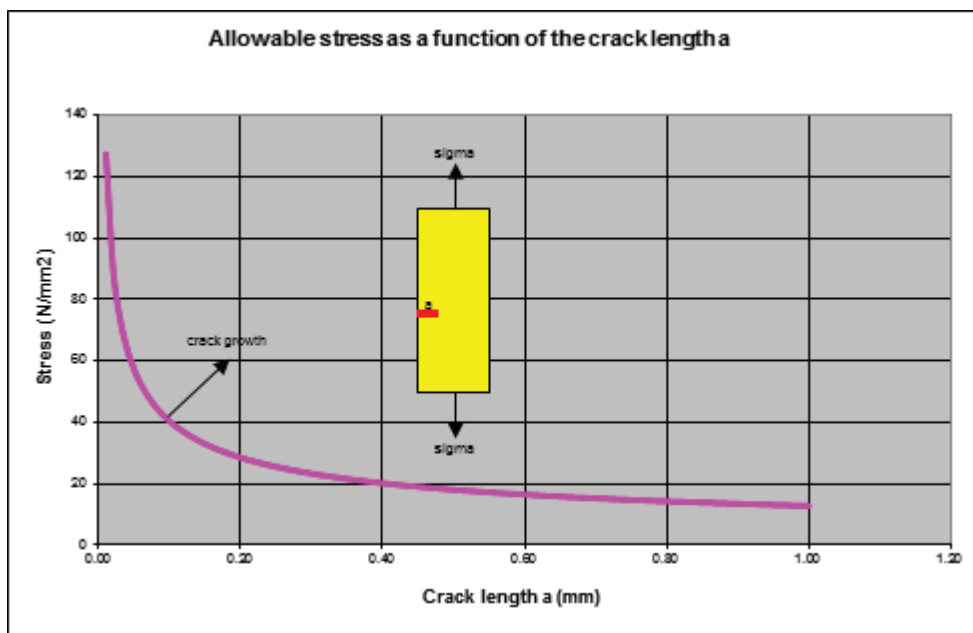
Bezocht: 24-06-2013

Wageningen UR

<http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Chair-groups/Agrotechnology-and-Food-Sciences/Laboratory-of-Physical-Chemistry-and-Colloid-Science/Education/MSc-education/Advanced-Soft-Matter-PCC31806/Case-Study-Topics.htm> Bezocht: 24-06-2013

Bijlage I Sterkte-analyse structuren in glas

Het aanbrengen van microstructuren in glazen platen kan wellicht de sterkte van de glasplaat nadelig beïnvloeden. De sterkte van een glazen plaat wordt uitgedrukt met de toelaatbare spanning. Wanneer de spanning in het materiaal hoger wordt dan de toelaatbare spanning, dan zal het materiaal breken. De spanningsintensiteitsfactor wordt berekend volgens: $K1 = C * \sigma * \sqrt{\pi * a}$. Voor $C = 1.12$, $\sigma = 1 \text{ N/mm}^2 (= \text{MPa})$, $a = 10 \mu\text{m}$, wordt $K1 = 0.20 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Uitgaande van een kritische spanningsintensiteitsfactor KIC met een waarde voor glas van $0,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (= 25,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}})$ levert dit bij een plaat met één randscheur met een diepte van $10 \mu\text{m}$ een toelaatbare spanning op van 127 MPa (zie Figuur 47.). Structuren met een veel grotere diepte dan de hier aangenomen $10 \mu\text{m}$ zullen de sterkte van de glasplaat significant meer doen afnemen ($100 \mu\text{m} = 40 \text{ MPa}$), dit los van het feit dat we in de structuur met meerdere groeven te maken hebben.



Figuur 47. Toelaatbare spanning in een glasplaat als functie van de scheurdiepte (microstructuur).

Bijlage II Opzet plantproeven met experimenteel kasdek materiaal

Doel van de plantproeven is om uit te zoeken wat het effect is van het aanbrengen van micro- en nanostructuren op het kasdek materiaal op de productie van planten. Hiervoor moeten de twee effecten van microstructuren gesplitst worden:

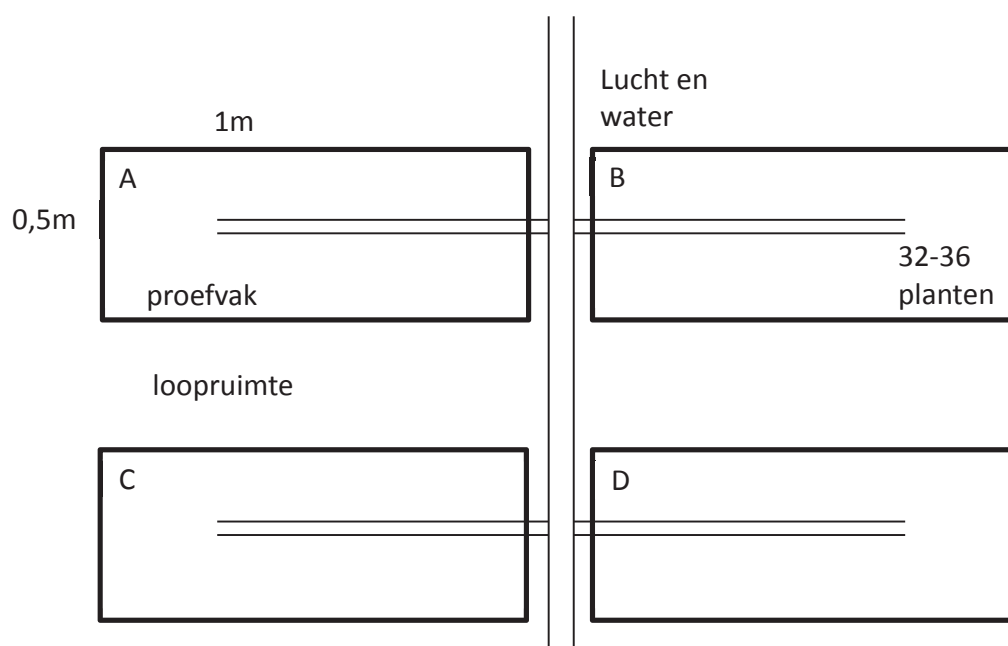
- Diffuserend effect. Het licht dat op de microstructuren valt wordt voor een deel rechtstreeks doorgelaten, maar zal ook deels afgebogen worden, waardoor het licht dieper in het gewas doordringt en naar verwachting een verhoogde productie zal geven. Het effect van diffuus licht op de productie van planten is het grootst in de zomer. In de zomer vangen de bovenste bladeren het meeste licht op maar gaan er niet echt efficiënt mee om. Als die hoeveelheid licht gespreid wordt over de verschillende bladlagen, dan zal de productie van de plant toenemen. Dit effect kan dus vooral aangetoond worden op het moment dat er in de proefopstelling een grote hoeveelheid licht aanwezig is, vanuit een hemisferische bron (de zon).
- Verhoogde hemisferische transmissie. Doordat de microstructuren de brekingsindex van lucht naar glas (en bij uittrekking andersom) geleidelijk laten gaan, treden er minder reflectieverliezen op. Ruwweg betekent een extra procent licht in de kas een procent extra productie. Dit effect van de microstructuren zal vooral aangetoond moeten worden tijdens proeven in perioden met weinig licht, dus vooral in najaar en winter.
- Als de effecten in de zomer tegelijkertijd optreden, zal er een situatie ontstaan dat het materiaal met microstructuur diffuserend werkt, maar tegelijkertijd eenzelfde hemisferische transmissie heeft als standaard glas.

Er moet dus gezorgd worden dat er zoveel mogelijk licht in de kasjes terecht komt. Hierop wordt de proefopstelling ontworpen.

Proefopstelling

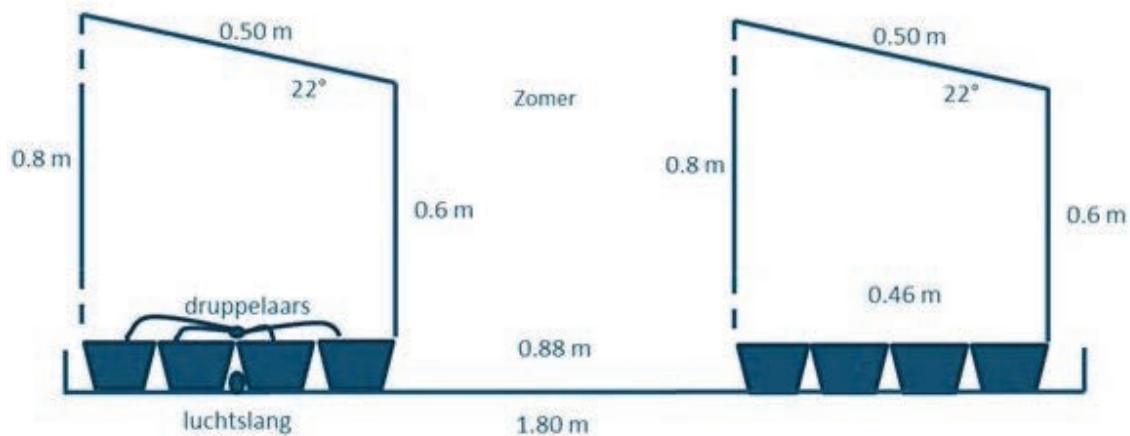
De proefopstellingen moeten op kleine schaal gebouwd worden, omdat er met experimentele materialen gewerkt wordt die nog niet op grote schaal gemaakt kunnen worden. Deze kleine schaal vereist dat er meerdere herhalingen tegelijkertijd uitgevoerd worden, om statistische verschillen te kunnen krijgen tussen de verschillende behandelingen. Twee behandelingen moeten sowieso uitgevoerd worden, helder en diffuus referentiemateriaal. Naast deze behandelingen kunnen een aantal experimentele materialen getest worden.

De lay-out van de totale proefopzet voor één herhaling in de ruimte ziet er globaal uit zoals in Figuur 48, de technische details worden later vastgesteld in overleg met Rob Pret. Voor de totale proef wordt deze opstelling vier keer herhaald in de ruimte en zoveel mogelijk keer in de tijd.



Figuur 48. Lay-out van de totale proefopzet voor één herhaling in de ruimte.

Het ontwerp van de individuele proefvakken is te zien in Figuur 49.



Figuur 49. Zijaanzicht van de proefvakken met druppelaars en luchtslang in de zomeropstelling.

Er is een zomeropstelling en een winteropstelling ontworpen, om te zorgen dat er in elke situatie voldoende licht in de kasjes komt. In de zomer komt de zon hoger en kunnen de kasjes dicht bij elkaar staan, in de winter staat de zon lager en moeten de kasjes verder uit elkaar staan om niet voor schaduwvorming te zorgen. De lage kant van de opstelling komt naar de zon toe te staan, om zoveel mogelijk zonlicht binnen te laten via de bovenkant van de opstelling, waar het testmateriaal op is aangebracht. De zijkanten van de meetopstelling worden gemaakt van spiegelen folie op een wandje, om een oneindige kas na te bootsen. Aan de achterkant van de opstelling zullen openingen gelaten worden om een goede uitwisseling van lucht tussen het compartiment en de grote kas mogelijk te maken, zodat de luchtvochtigheid en de temperatuur niet te hoog oplopen. Om de CO₂-concentratie op peil te houden en de lucht in beweging, worden er luchtslangen in de vakken gelegd. Daarnaast komt er een druppelsysteem om de planten van water en voedingsstoffen te kunnen voorzien.

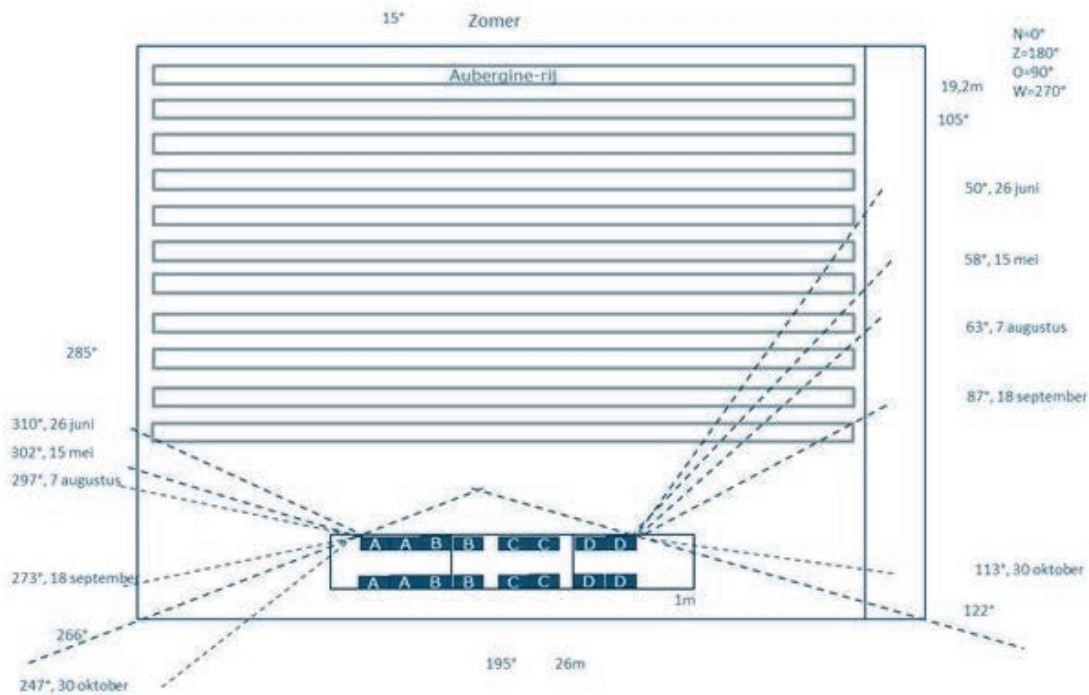
De testvakken zullen zo gemaakt moeten worden dat ze open kunnen, om verzorging van het gewas mogelijk te maken. Er zal bijvoorbeeld gewasbescherming moeten worden toegepast om aantasting door plagen tegen te gaan en zo de proef niet te beschadigen. De proefopstellingen komen op tafels te staan, zodat in de eerste plaats het overtollige water kan worden opgevangen en in de tweede plaats de proefopstellingen hoger komen te staan en de verwarmingsbuizen geen licht wegvangen en teveel stralingswarmte toevoegen aan de voorste proefvakken.

Testmateriaal

De tests gaan uitgevoerd worden met chrysant, om een kasvullend gewas na te bootsen en daarmee het diffuus effect te kunnen aantonen. Chrysant heeft een hoge LAI en is daardoor geschikt om de doordringing van het licht in het gewas onder de kasdekken met structuur te vergelijken met standaard glas. De planten groeien voor ongeveer 6 weken in de kleine kasjes, zodat er veel herhalingen in de tijd kunnen worden gedaan, maar ook zo, dat omschakelen naar de kortedag periode van het gewas wordt voorkomen, omdat daar het effect van licht als gevolg van de structuur minder duidelijk te meten is. Er wordt gezocht naar een chrysantensoort die een maximale reactie laat zien bij lage lichtomstandigheden, dus eigenlijk een cultivar die inefficiënt omgaat met licht, omdat dan de grootste verschillen optreden bij verschillende lichtomstandigheden.

Locatie

Om het effect van groeionderdrukking in de zomer van de bovenste bladeren goed tot z'n recht te laten komen wordt de zuidkant van de Sunergy kas voorgesteld als plaats van de proefopstellingen. Dit vooral, omdat de Sunergy kas de hoogste lichtwaarden toont van alle kastypen in Bleiswijk. Om het effect te maximaliseren moet de kanaalplaat van die zuidgevel worden vervangen door helder glas. Van de aubergines die daar nu worden geteeld moeten de eerste drie rijen met worden weggehaald om plaats te maken voor de proefopstelling (zie Figuur 50.).



Figuur 50. Bovenaanzicht sunerygykas met opstelling micro-V project in de zomer. De hoeken die de zon door het jaar heen maakt zijn in de Figuur aangegeven als stippellijnen.

Het zijaanzicht van de opstelling in de zomer ziet er als volgt uit (zie Figuur 49.). De platen die bovenop de opstelling liggen zijn 1m bij 0,5m. Dit betekent dat de breedte van de constructie 46cm moet zijn en de lengte 1m. In alle hokken moeten druppelaars komen om de chrysanten van water te voorzien. Ook moet er een slang voor luchttoevoer in komen te liggen om de CO₂ concentratie op peil te houden en te ontvochtigen. De vier zijwanden van de hokjes moeten spiegelend zijn, om een 'oneindige' kas na te bootsen. Het liefst willen we de opstellingen zo licht mogelijk maken, dus misschien is het mogelijk om een spiegelend folie te gebruiken en die op een dragermateriaal te bevestigen. De achterwand moet deels open zijn om een goede luchtuitwisseling mogelijk te maken tussen de hokjes en de lucht in de grote kas. Het dak van de proefhokjes moet op het laagste punt 60cm boven de bovenkant van de potten uitkomen, omdat het gewas binnen de proefperiode 50-60cm groeit. De lage kant van de opstelling komt naar de zuidkant toe te staan.

Metingen

De proef is bedoeld om de extra fotosynthese aan te tonen die mogelijk wordt door de hoge lichttransmissie van het kasdek materiaal en het diffuserend effect. De verschillen hierin tussen de proefvakken zullen vooral te zien zijn in het drooggewicht van de planten. Die zal in ieder geval voor het complete proefvak bepaald worden aan het einde van de proefperiode en eventueel halverwege de proef met een deel van de planten uit de proefvakken. Ook het versgewicht zal bepaald worden. Er kan voor gekozen worden om tussentijds fotosynthesemetingen uit te voeren, maar de verwachting is dat er geen verschillen zullen optreden in de fotosynthesecapaciteit van de bladeren. Als dit één keer is aangetoond zal het niet noodzakelijk zijn deze metingen nogmaals uit te voeren. Lengtemetingen zullen gedaan worden om aan te kunnen tonen of de verschillen in drogestofgewicht ontstaan door extra strekking, of door het maken van extra dikke stelen.

Gedurende de proef zal de temperatuur en de luchtvochtigheid in de proefvakken gemonitord worden. Eventuele verschillen in productie kunnen dan worden verklaard door verschillen in klimaatomstandigheden. Om dit te voorkomen moeten de klimaatomstandigheden zoveel mogelijk gelijk zijn. Hier is voor gezorgd door de grote luchtuitwisseling tussen de kleine kasjes en de grote kas. Ook het lichtniveau in de grote kas en in een aantal proefvakken zal gemeten moeten worden, zodat eventuele verschillen in productie die ontstaan kunnen zijn door lichtverschillen kunnen worden aangetoond. Door inbreng van de lucht en CO₂ via een luchtslang kan een voldoende luchtdoorstroming en een voldoende aanvoer van CO₂ worden gewaarborgd, hetgeen ten goede komt aan de afvoer van vocht in de kleine testkasjes en zoveel mogelijk gelijke waarden van de CO₂ concentratie in de kasjes. De CO₂ kan dan via één instrument in de aanvoerslang worden gemonitord.

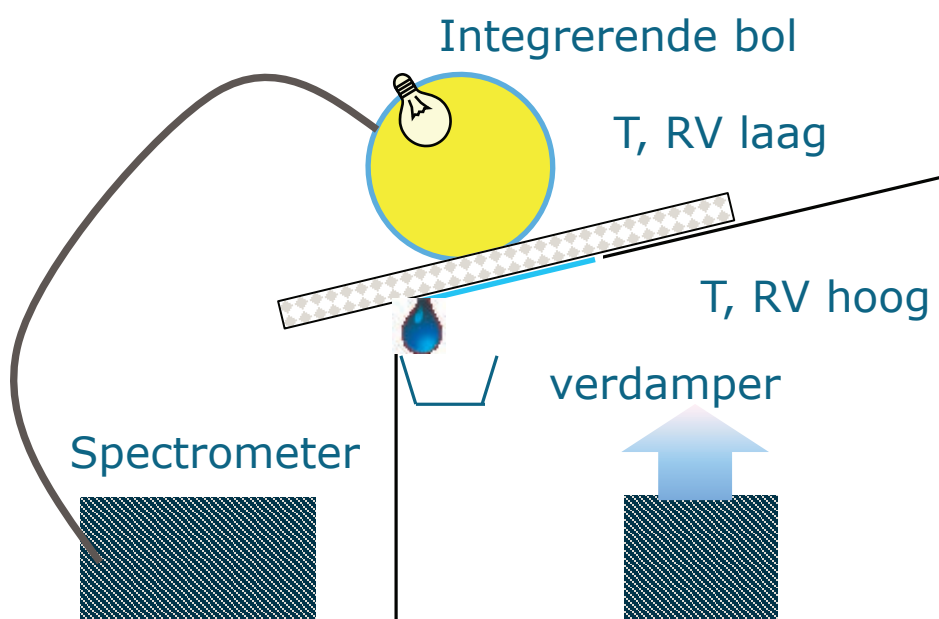
Klimaat

Als de proeven in de Sunergy kas worden uitgevoerd, staat er naast de chrysant uit onze proef nog aubergine. De aubergine zal er voor zorgen dat het klimaat in de kas in ieder geval niet door een zeer klein aantal chrysanten hoeft te worden bepaald. De chrysanten zullen m.b.t. het klimaat dus “meeliften” met de aubergineplanten. Dit klimaat is dan voor alle kasjes hetzelfde, zodat hierdoor geen onderlinge verschillen ontstaan. Het klimaatregime in de kas moet dan in overleg met de teeltdeskundigen zoveel mogelijk tegemoetkomen aan de eisen van de chrysant.

Bijlage III Verkenning meting hemisferische transmissie onder condens omstandigheden

Uit eerder onderzoek is gebleken dat condensvorming op het kasdek van invloed is op de transmissie en het energieverlies van het materiaal (Janse *et al.* 2012; Stanghellini *et al.* 2010). Laboratoriummetingen door Stanghellini *et al.* (2010) hebben uitgewezen dat condensvorming de transmissie van kasdek materiaal met gemiddeld 9% verlaagd. Er zijn echter materialen waarvoor dit niet geldt, bijvoorbeeld materialen met een oppervlaktestructuur of met een anti-drop oppervlakbehandeling. Ook de hoeveelheid condens die gevormd wordt op het materiaal verschilt: diffuus glas vormt 30-350% meer condens dan vlak glas (Janse *et al.* 2010), gemeten in een kassituatie.

De meetopstelling in deze laboratoriumproeven had grote oppervlakten materiaal nodig om condensmetingen te kunnen uitvoeren. In de ontwikkeling van innovatieve materialen zijn echter vaak geen grote samples voorhanden, waardoor het lastig is het effect van het oppervlak van deze materialen op condensvorming te kunnen bepalen. Daarom is er binnen dit project een verkenning uitgevoerd naar het ontwerpen van een meetopstelling die ook voor kleine samples het effect van condens op de transmissie kan bepalen. In deze nieuwe methode wordt in een klimaatkamer een temperatuurverschil aangelegd tussen de binnenkant en de buitenkant van een meetbox (zie Figuur 51.). De meetbox heeft een gat in het dek, waarop een sample van het ontwikkelde materiaal kan worden aangebracht. Een verdamper aan de binnenkant van de box zorgt voor een hoge luchtvochtigheid en daarmee voor de vorming van condens op het sample, wat koel is door de lage temperatuur buiten de box. Condensatie zal hierdoor optreden aan de binnenkant van het sample. Een integrerende bol wordt op de buitenkant van het sample geplaatst (dus aan de andere kant van het materiaal dan het condens), waarmee de diffuse reflectie wordt gemeten van een lichtbron die in de bol aanwezig is. De diffuse reflectie is dan een maat voor de hemisferische transmissie.



Figuur 51. Ontwerp van een opstelling voor het bepalen van de hemisferische transmissie onder condensatie-omstandigheden.

Bijlage IV Investeringen en kosten van doorontwikkeling en productie van kasdekmaterialen met micro-V of nanostructuren

Bron: R. Wilde, Nanoptics (projectpartner tot 1-4-2013).

I suggest to split the expected costs for the next steps as follows:

1. Final definition of optimal nano/micro structure
2. Development of the final large volume production in large format
3. Cost for the glass manufacturer/converter.

Explanation:

Starting point is the basic research and the definition of potential nano structures for the required effect into the green house. A next step would be a proof of principal phase and then we need to develop the related process for volume production. In a final phase we would build the required equipment for the production at customer side and we need to make sure that we can produce the required consumables (large format) for the customer of Nanoptics.

1. Final definition of optimal nano/micro structures

Objectives

- Final definition of optimal nano/micro structures for light management in green house
- Final determination of optimal nano-textures for efficient light management in green house
- Definition of the process for the final large format mastering of the required structures

This would be a further development project, financed by a potential partner.

Description of work

- Manufacturing of required tooling inkl. masters (using existing master)
- Production of glass plates or film for an extended test (using existing equipment)
- Tests and measurements at WUR
- Modifications and further tests
- Simulations etc.
- Definition of mastering process

Deliveries

- Structured glass or film
- Measurements and report

Costs on developer (Nanoptics) side (estimation):

EURO 50,000 License costs for the existing small format structures

EURO 100,000 Tooling (enlargement, tools, work)

EURO 100,000 Production of samples, consumables, man work, etc.

EURO 250,000

2. Development of the final large volume production in large format

Objectives

Here we need to define the required equipment for the in house production of consumables for the replication of customer premises. In addition the equipment for the production of customer premises needs to be specified (no hardware will be build).

Description of work

- Extended test trials on existing R2Plate equipment (500 mm width and 600 mm shim repeat)
- Simulation of large format production on existing equipment (simulation of up to 2 m width, if possible)
- Definition and design of the large format production equipment for producing master film by developer (Nanoptics)
- Definition and design of the large format replication system for the structure transfer of customer premises
- Development of required lacquer compositions.

Deliveries

- Concept and CAD files for both machine systems (1,5 m width and 1 m repeat)
- Development of a standard lacquer composition for using in green house environment

Costs on developer (Nanoptics) side (estimation):

EURO 100,000 Test trials (man work, consumables etc.)

EURO 100,000 Required tools

EURO 50,000 CAD files etc.

EURO 200,000 Lacquer compositions (just a guess...)

EURO 350,000.

3. Costs for the glass manufacturer/converter

Costs for:

1. Mastering of needed structures
2. Development of specific lacquer composition
3. Equipment
4. Depreciation and maintenance
5. Consumables

Here we speak about costs for the customer in terms of equipment, running costs and costs of consumables.

1. Required nano structures

There are different options for covering the costs for the required large format master (1 or 2 different structures):

- Paid by the glass manufacturer
- Paid by developer (Nanoptics) and costs needs to be included in to the consumables.

We assume that we only need one combination of 2 structures for the entire industry.

EURO 100,000 - 150,000 / structure –

for the master from which you can make copies

EURO 200,000 - 300,000.

2. Adaptation of specific lacquer composition

Any customer may have specific requirements for the lacquer. This will cause costs which can only be estimated.

EURO 30,000 / customer.

3. Equipment

So far we always stated a potential price of EURO 1 Million for an application machine at customer side. Of course, we don't know the specification of the customer so far.

EURO 1,000,000.00.

4. Depreciation and maintenance

Estimated at EURO 2.00 / m².

5. Consumables

Since we plan to use a master film which the customer can use up to 10 times for structuring of their glass plates we still stick to the calculation we did in the past.

EURO 5 - 7 / m² Master film


EURO 0.50 / m² Coating / Lacquer

Bijlage V Relatie investeringsruimte (investment capacity) en extra productie voor de teelt van tomatomaat, roos en Phalaenopsis

Bron: Ruijs, M. Potential investment capacity of micro-V coverings in greenhouse structures. Presentatie werkgroep Micro-V, Philips, Eindhoven, 2 juli 2012.


Starting points economic analysis

- Greenhouse set-up according to KWIN and practice
- Impact of micro-V covering
 - Extra light transmission and related items
 - No energy saving
- Standard hort. tempered glass cover: 6-7 €/m²
- Revenues pilot crops:
 - Truss tomato: 45 €/m²
 - Rose: 80 €/m²
 - Phalaenopsis: 210 €/m²



Results Investment capacity >truss tomato

Investment capacity (euro/m ²)	Extra yield yearly costs (%)		
	10	15	20
1	3.9	2.6	2.0
2	7.9	5.2	3.9
3	11.8	7.9	5.9
4	15.7	10.5	7.9
5	19.6	13.1	9.8
6	23.6	15.7	11.8
7	27.5	18.3	13.7
8	31.4	20.9	15.7
9	35.3	23.6	17.7
10	39.3	26.2	19.6



Results Investment capacity > rose (Red Naomi)

Investment capacity (euro/m2)			
Extra	yearly costs (%)		
yield (%)	10	15	20
1	9.2	6.1	4.6
2	18.4	12.3	9.2
3	27.7	18.4	13.8
4	36.9	24.6	18.4
5	46.1	30.7	23.0
6	55.3	36.9	27.7
7	64.5	43.0	32.3
8	73.7	49.2	36.9
9	83.0	55.3	41.5
10	92.2	61.5	46.1

Results Investment capacity > Phalaenopsis

Investment capacity (euro/m2)			
Extra	yearly costs (%)		
yield (%)	10	15	20
1	16.7	11.1	8.3
2	33.4	22.3	16.7
3	50.1	33.4	25.0
4	66.8	44.5	33.4
5	83.4	55.6	41.7
6	100.1	66.8	50.1
7	116.8	77.9	58.4
8	133.5	89.0	66.8
9	150.2	100.1	75.1
10	166.9	111.3	83.4

2 Gestructureerde flexibele PV-cellen (Universiteit Utrecht)

2.1 Inleiding

2.1.1 Aanleiding

In the search for renewable energy sources, solar energy can fulfill a large part of the growing demand. The biggest threshold for large-scale solar energy harvesting is the solar panel price. For drastic cost reductions, continuous fabrication of thin film silicon solar cells using plastic substrates can be a solution. In this project, we investigate the possibilities of depositing thin film solar cells directly onto cheap plastic substrates. For solar energy generation to become a feasible alternative to fossil fuel based electricity generation or to other means of renewable energy generation, the price of solar cells is extremely important. Thin film silicon solar cells have the potential to be fabricated much cheaper than their crystalline silicon counterparts. Not only the amount of material used is greatly reduced, also the energy input to fabricate thin film solar cells is much smaller than for c-Si cells, resulting in a lower so-called energy payback time. If a flexible material is chosen for the substrate, bendable cells can be made, which have a number of advantages over rigid substrates, such as glass, without loss in efficiency. First of all, plastics such as polyethylene terephthalate (PET), polyethylene naphthalate (PEN) and polycarbonate (PC) are much cheaper than glass. More importantly, flexible substrates enable a roll-to-roll process, in which cells can be produced in a continuous process, rather than a batch-type process, used for glass substrates. Especially when working with vacuum equipment, roll-to-roll processing can yield large cost reductions. Furthermore, flexible cells can be shaped in many ways, making integration into buildings and architecture possible. Using a lightweight and unbreakable substrate, such as plastics, savings can be made in transport costs. It has to be noted that the highest initial efficiency of 16.3% for thin film silicon solar cells has been obtained on a flexible substrate (stainless steel foil).

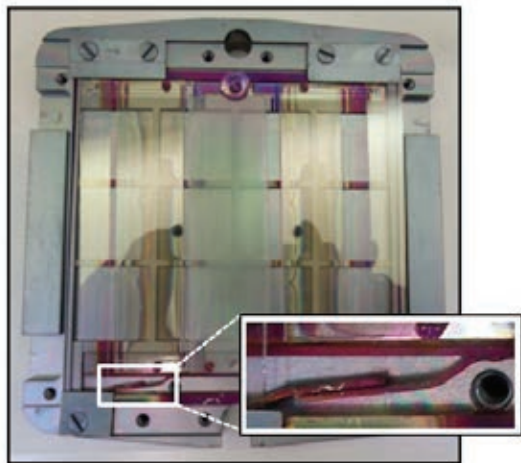
2.1.2 Doelstelling

The main challenge in depositing thin film solar cells directly on plastic flexible substrates are the limitations imposed on deposition temperature. If we want to use cheap plastics such as PET, PEN or PC, we are limited to deposition temperatures of 70-100 °C, 150 °C or 130 °C, respectively. To fabricate low-cost thin film solar cells, not only the material costs of the TCO, absorber material and the substrate material are important, also throughput is important. For micromorph tandem cells, the bottom nc-Si:H cell has a typical thickness of 1 to 3 μm , which has an impact on deposition times and therefore on manufacturing costs. Moreover, the top a-Si:H cell has to be thin, because thick a-Si:H cells are more sensitive to light induced degradation than very thin a-Si:H layers. For these reasons, thin absorber layers should be used. However, to ensure good light absorption within the active layers, light trapping schemes must be deployed. These schemes have the purpose to enlarge the optical path of travelling photons in the cell, while keeping the electrical paths short, enabling a good light absorption without sacrificing too much on electrical performance.

The traditional way in thin film (superstrate) p-i-n solar cells is to create a rough interface between the TCO and the p-layer of the cell, by texture etching the doped ZnO in an acidic solution or depositing natively textured $\text{SnO}_2\cdot\text{F}$ or rough silver. In this research we will study how effective is micro-V structures, developed for greenhouse roofs, for solar cells and this is considered as a spin-off use of the micro-V structured plastics.

2.2 Materiaal en methode

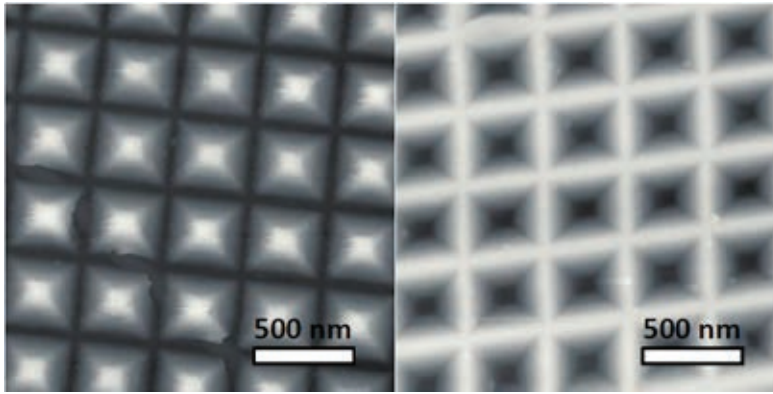
To be able to deposit thin film cells on plastics, the process temperature should never exceed the glass transition temperature of the substrate used, for all the processing steps. For polycarbonate, this transition temperature is around 145 °C, which is lower than the experimentally found optimal substrate temperature of 200 °C for a-Si deposition. The consequences of low substrate temperature for the electronic quality and optical properties of the a-Si:H material have been discussed in the previous chapter. We studied the deposition of front TCOs on flexible substrates and their adhesion to these substrates. Because we use plastics as a substrate, we also check whether there is degassing from the material that could contaminate the growing layer or the vacuum system. Because the thermal expansion coefficient of PC is rather high, compared to the substrate holder material, we employed a specially designed substrate holder (Fig.1) that allows stretching of the substrate while it expands.



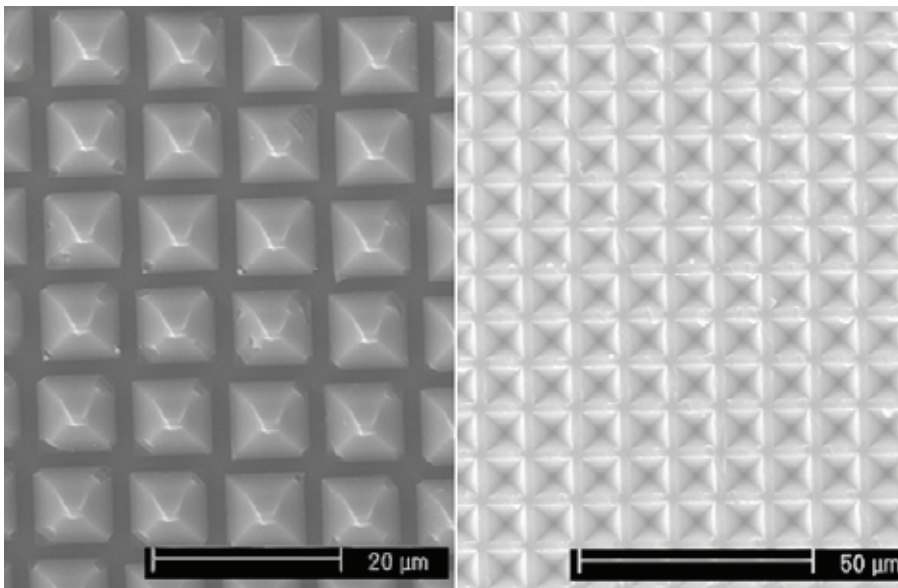
Figuur 1. The substrate stretch holder, which is used to maintain a good contact between the substrate holder and the substrate and to avoid curving of the substrate.

To test the light trapping abilities of our different structured substrates, we deposited single junction a-Si solar cells in a p-i-n configuration on the different substrates shown in Figuur 2. and Fig.3. As a front TCO we used ZnO:Al, deposited in our RF magnetron sputtering system, SALSA, from a ZnO:0.5%Al₂O₃ target at room temperature. As a BR we used ZnO:Al from a ZnO:2% Al₂O₃ target. The silicon layers were deposited in our ultra-high vacuum multi-chamber system ASTER by VHF-PECVD at a frequency of 60 MHz, using a showerhead electrode. The p- and n-layers were deposited at 50 MHz in separate chambers. The substrate temperature during deposition was set at 130 °C and is expected to increase 7 °C to 8 °C during the deposition. The metal contacts were deposited by thermal evaporation of silver and aluminum. The cell structure was as follows: The substrate, a 1000 nm ZnO:Al front TCO, a double p-structure of nanocrystalline and amorphous silicon of 15nm (in total), a 275nm thick intrinsic a-Si layer, a 30nm thick a-Si n-layer, a 100nm ZnO:Al BR and a silver/aluminum back contact. After deposition, the cells were annealed in a nitrogen environment for 1 hour at 125 °C. The area of the cells was 0.16 cm². As a reference, cells were deposited on 2 other types of substrates: (1) Asahi U-type natively textured fluorinated tin oxide (SnO₂:F) TCO glass and (2) flat glass (Corning Eagle 2000) substrates with an untreated flat ZnO:Al TCO layer, under the same low temperature deposition conditions. For reference purposes, a cell deposited on a flat PC surface would be the best candidate, but the stress of the ZnO:Al layers prevented flat PC to be used as a substrate, due to cracking of the ZnO:Al layers.

We produced nc-Si single junction solar cells on glass in a p-i-n configuration. As a front transparent conducting oxide (TCO) we used aluminum doped zinc oxide (ZnO:Al) which was sputter-deposited, followed by texture etching in a hydrochloric acid solution. As a back contact we used evaporated silver, after sputter-depositing a ZnO:Al back reflector. The thickness of the intrinsic layers of the cells was aimed at 700 nm, based on deposition rate. Before characterization, the cells were annealed in a nitrogen environment for 1 hour at 125 °C. The size of the cells was 0.16 cm².



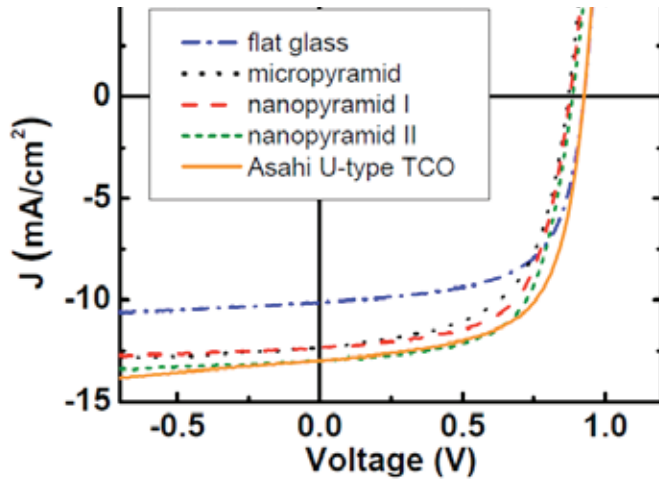
Figuur 2. AFM images of the convex nanopyramid structured PC (left) and concave nanopyramid structured PC (right).



Figuur 3. SEM images of convex pyramids (left) and concave pyramids (right) embossed on polycarbonate. These substrates are used for geometric light trapping.

Deposition rate becomes an issue at low deposition temperature. We have been successful in depositing nc-Si:H at a reasonably high deposition rate (0.51 nm/s using high pressure (3 mbar) and high power and a showerhead cathode for the gas distribution in the plasma zone for the deposition. This is an adaptation of the deposition process which delivered 10% efficiency nc-Si:H cells at standard deposition temperature (180 °C).

The single junction a-Si:H cells and the nc- Si:H cells described above were combined to produce a-Si:H/nc-Si:H tandem cells at 130 °C. A double p-layer (nc-Si:H/a-Si:H) was used to make proper contact with the texture etched ZnO:Al front TCO. The complete solar cell structure was as follows: Superstrate/ZnO:Al TCO/p nc-Si:H/p a-Si:H/l a-Si:H/n a-Si:H/p nc-Si:H/i nc-Si:H/n a Si:H/ZnO:Al/Ag/Al.



Figur 4. Current density - Voltage characteristics for cells deposited on different embossed PC substrates at 130 °C. As a reference J-V characteristics for cells on flat glass and on Asahi textured TCO glass are also shown.

Table 1. Initial electrical properties of cells deposited at 130 °C on flat ZnOAl coated glass substrates, micro- and nanopyramid structured PC substrates and Asahi U-type textured glass as measured by J-V measurements under AM1.5 illumination and under dark conditions.

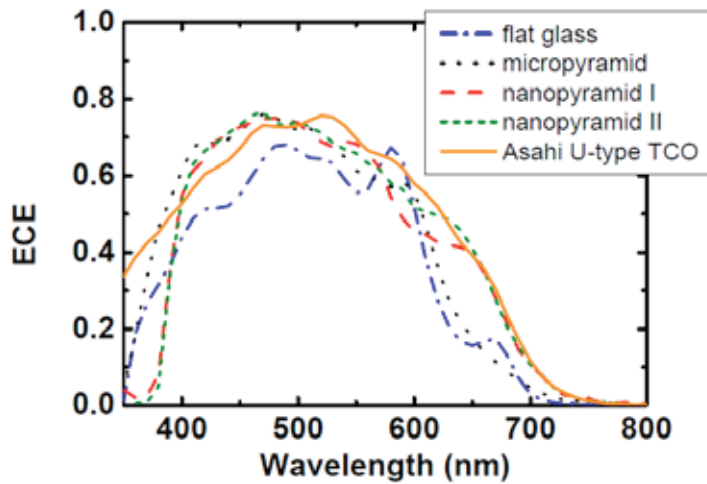
Substrate type	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	n	J_0 (mA/cm ²)	R_s (Ω cm ²)	R_p (Ω cm ²)	η (%)
Flat glass	10.14	0.93	64	1.49	5.6×10^{-10}	7.5	1166	5.6
Micropyramid	12.35	0.87	59	1.90	4.7×10^{-8}	9.7	801	6.4
Nanopyramid I	12.33	0.88	63	1.69	4.7×10^{-9}	9.3	964	6.8
Nanopyramid II	12.98	0.89	64	1.98	1.3×10^{-7}	9.0	1116	7.4
Asahi U-type	12.81	0.93	64	1.49	2.0×10^{-10}	9.1	1250	7.6

J_{sc} : short-circuit current density; V_{oc} : open-circuit voltage; FF: fill factor; n: diode quality factor; J_0 : reverse saturation current; R_s : series resistance; R_p : parallel resistance; η : conversion efficiency. Type I: concave pyramids; type II: convex pyramids

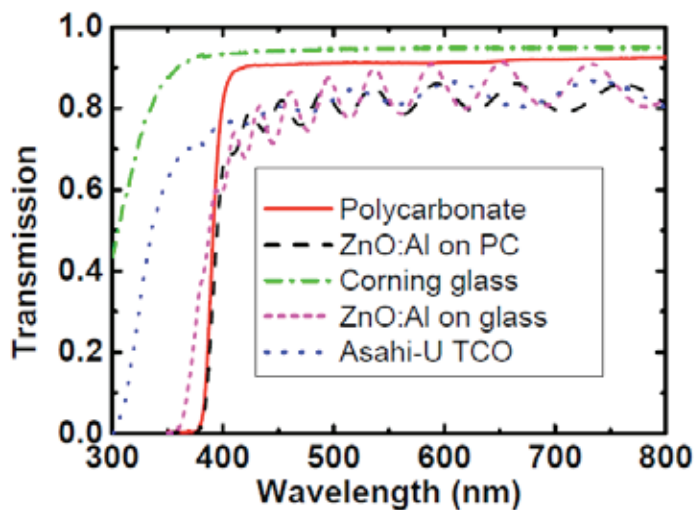
2.3 Resultaten

Figur 4. shows the J-V measurements of the cells on flat glass, Asahi-U TCO glass, micropyramid structured PC and on nanopyramid structured PC substrates. Table 1. shows the electrical properties for all types of cells, as obtained by J-V measurements under dark conditions and under AM1.5 illumination after annealing at 125 °C for 1 hour in a nitrogen environment. The cell on micropyramid structured PC shows an increase in J_{sc} of 22%, compared to the cell on a flat glass substrate. The cell on concave nanopyramids (type I) shows a short-circuit current density increase of 22%, whereas the convex nanopyramids (type II) enhance the current density by 28%. The current generated by the cells on convex nanopyramid structured PC substrates is slightly higher than that of the reference cells on Asahi U-type TCO. Figure 5. shows the spectral response data for three types of cells on PC and the cells on flat glass and on Asahi U-type TCO glass. All cells on structured or textured substrates show a significantly higher quantum efficiency at wavelengths higher than 400 nm, when compared to the cell on a flat substrate, which can be ascribed to anti-reflective properties and better response in the red part of the spectrum. If we compare the spectral response of the cells on nanopyramids to that of the cell on Asahi TCO, we observe a comparable response at wavelengths above 600 nm, a small decrease in quantum efficiency for wavelengths between 500 and 600 nm, whereas the response between 400 and 500nm is higher. This results in a total short-circuit current density generation that is slightly higher for the cell on convex pyramids and a bit smaller for the cell on concave pyramids, compared to the cell on Asahi TCO. The cell on micropyramid structured PC,

when compared to the cell on Asahi U-type TCO-glass, shows a total current density that is about $0.5\text{mA}/\text{cm}^2$ lower. This is mainly caused by the difference in response above 500 nm .

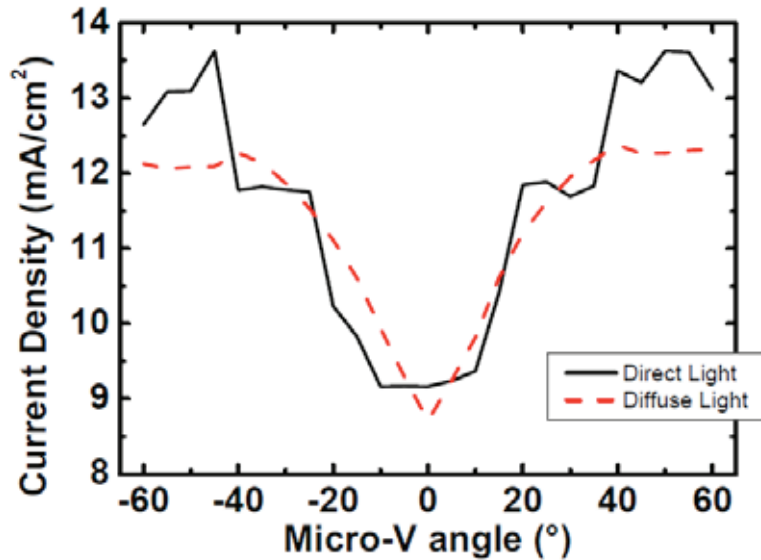


Figur 5. External collection efficiency measurements of cells deposited on different embossed PC substrates at $130\text{ }^\circ\text{C}$. As a reference the measurements for cells on flat glass and on Asahi textured TCO glass are also shown.

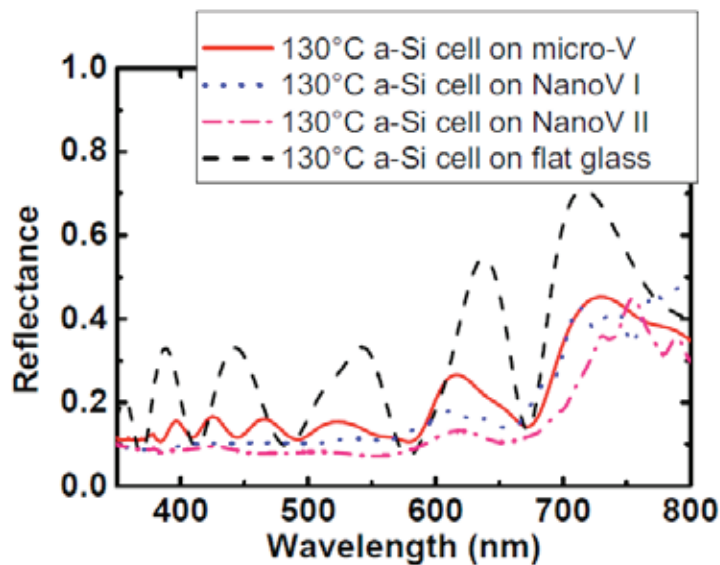


Figur 6. Total transmission of glass and PC substrates with and without ZnO:Al and the total transmission of Asahi U-type TCO glass.

In the ultra-violet part of the spectrum, below 400 nm , absorption of light by the substrate and the TCO dominate spectral response behavior. The cell on Asahi TCO, which is made of $\text{SnO}_2:\text{F}$, shows transparency down to 300 nm , whereas $\text{ZnO}:\text{Al}$, due to its lower band gap for the samples in this study, cuts off the light below 350 nm . PC is not transparent for light of wavelengths below 380 nm . This is illustrated in Figure 6, which shows the transmission of glass and PC with and without the $\text{ZnO}:\text{Al}$ front contact and of Asahi U type TCO glass. These differences in ultra-violet transmission account for the difference in spectral response in this wavelength region. The cells on flat glass and on Asahi TCO show a high V_{oc} of 0.93 V . This is caused by the high optical band gap of the intrinsic $\text{a-Si}:\text{H}$ deposited at low temperature (1.9 eV), which is attributed to a higher hydrogen content in the film. The cell on structured PC shows a lower V_{oc} of 0.87 V , which can be attributed to a higher dark current (J_0), caused by defects. The cell on micropyramid structured PC shows a conversion efficiency of 6.4% , which is around 1% absolute lower than the cell on textured Asahi TCO, which has a slightly higher V_{oc} and a higher fill factor of 64% , compared to 59% for the cell on micropyramid structured PC. The cells on nanopyramid structured concave and convex pyramids show an efficiency of 6.8% and 7.4% , respectively, which is slightly lower than that of the cell on Asahi TCO, due to a lower V_{oc} .



Figur 7. Simulated current density of a-Si cells on micropyramid structured substrates for direct light (solid) and diffuse light (dashed) for different pyramid angles.



Figur 8. Total reflection of a-Si cells deposited on flat glass substrates, on micropyramid structured PC substrates and on both types of nanopyramid structured PC. All cells were deposited at a substrate temperature of 130 °C.

Our simulation results (Figure 7.) had shown that a current enhancement for micropyramid structured substrates is possible up to 45%. Experimentally, for a pyramid angle of 54°, which is close to the calculated optimum pyramid angle, a current enhancement of 22% has been observed, compared to cells on a flat glass substrate. The micropyramid structured substrates that we used have a flat surface area of around 30%, due to the fabrication method, which explains a lower current enhancement than expected for a substrate that is completely filled with pyramids. A better coverage, using the same embossing technique, could be achieved by using larger-size pyramids. According to the simulations, the increase in absorbed light is mainly caused by a decrease in reflection of light from the top surface of the cells. Figure 8. shows the measured total reflection from the cell on micropyramid structured PC, both types of nanopyramid structured PC and the cell on flat glass. The cell on the micropyramid structured substrate shows a lower reflection over the whole measured spectral range. This results in a generated current density in the cell on structured PC which is comparable to the cell on Asahi TCO, but the cell on structured PC suffers from a lower V_{oc} and a lower FF than the cell on Asahi. The cell on PC has a higher diode quality factor (n) value of 1.90 compared to the cell on Asahi (1.49) and has a saturation current density which is 2 orders of magnitude higher than the latter.

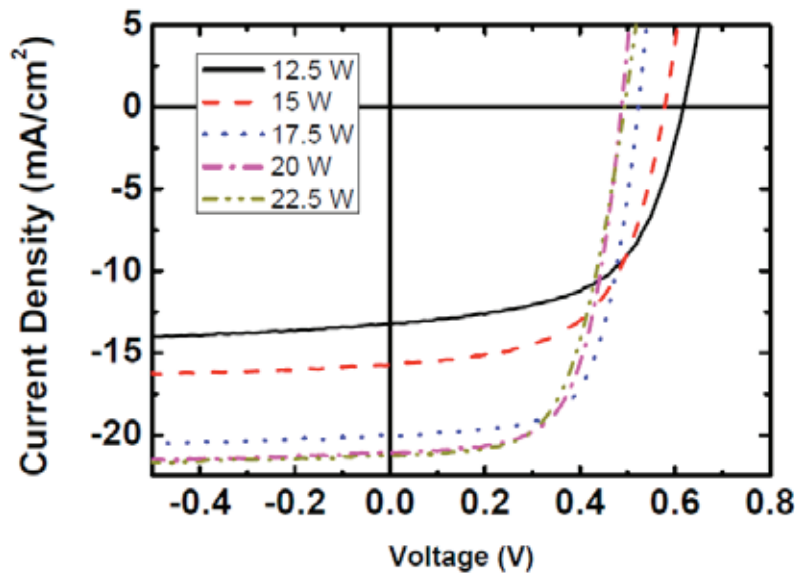


Figure 9. J-V curves for nc-SiH cells deposited at 130 °C on glass substrates as a function of applied VHF power. The structure of the cell is glass/20nm p-nc-SiH/700nm i-nc-SiH/30nm n-a-SiH/100nm ZnOAl/Ag/Al.

2.3.1 Nanocrystalline silicon cells

Figure 9. shows the current density-voltage (J-V) characteristics of nc-Si:H cells, as a function of applied plasma power around the transition from a-Si:H to nc-Si:H. Going from 12.5W to 22.5 W, the material changes from mostly amorphous to almost fully crystalline. The short-circuit density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), fill factor (FF) and the resulting conversion efficiency (η) show increase after annealing for 1 hour at 125 °C. For the cells made from the layers in this series results in an increasing current density up to 20W applied plasma power, which can be attributed to a lower band gap for the material made at higher power.

2.3.2 Tandem cells

We used very thin layers as the photo-active layers: 275nm of a-Si:H for the top cell, combined with a nc-Si:H bottom cell with an i-layer of 700 nm. Figure 10. (solid) shows the external collection efficiency (ECE) data for the resulting tandem solar cell structure, showing the spectral response for the top a-Si:H cell and the bottom nc-Si:H cell separately and the total (sum) ECE of the structure. The calculated current densities for the cells showed a mismatch between the top and bottom cells: 8.8mA/cm² for the top cell and 7.6mA/cm² for the bottom cell. Based on these measurements we redeposited the solar cell structure, but now using a thicker bottom cell of 900 nm for better current matching. The results are also in Figure 10. (dashed). Calculated from the spectral response measurements, the bottom cell current increased to 9.1mA/cm², whereas the top cell current also increased slightly, to 9.2 mA/cm². The increase in top cell current is probably due to a slight change in deposition conditions.

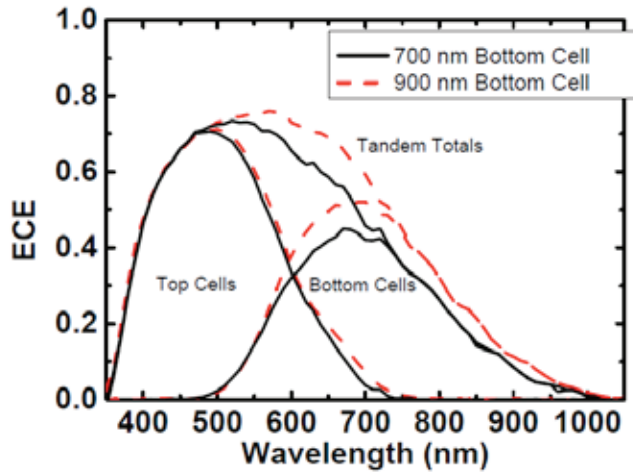


Figure 10. Spectral response characteristics for tandem cells deposited on glass substrates at 130 °C, showing cells with two different bottom cell thicknesses 700nm (solid) and 900nm (dashed). The spectral response for the top cell, bottom cell and summed up response are shown individually.

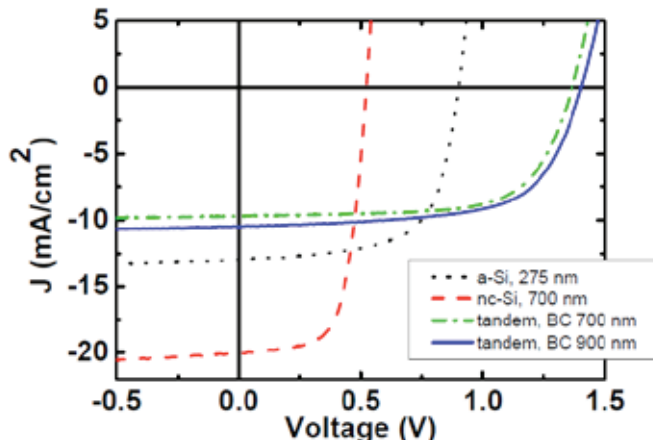
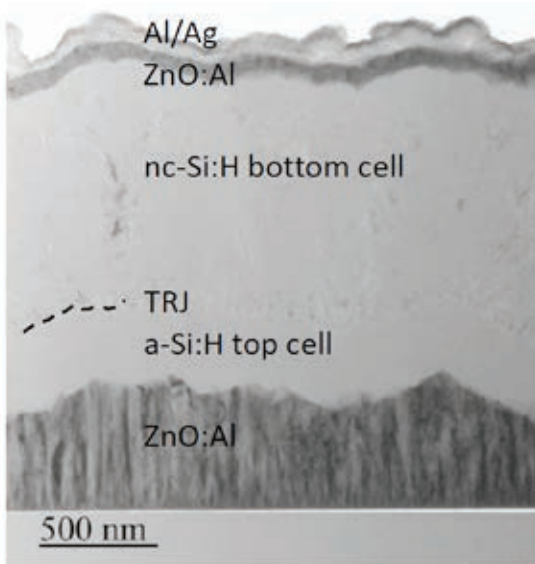


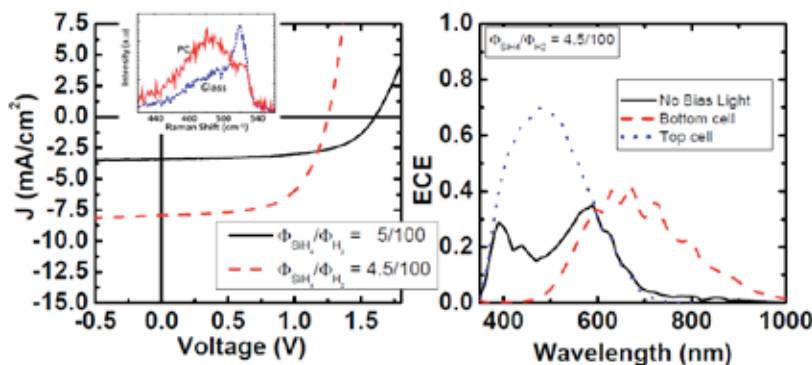
Figure 11. J-V characteristics for cells deposited on glass substrates at 130 °C under AM1.5 light conditions, showing cells with two different bottom cell thicknesses 700nm (dashed) and 900nm (solid). Also the J-V characteristics of the single junction cells on which the tandem was based are shown.

Figure 11. shows the J-V curves under AM1.5 illumination of the a-Si:H cell (275 nm) and the nc-Si:H cell (700 nm) on which the deposition recipe for the tandem was based, and the resulting tandem cell. Also shown is the tandem cell with an i-layer thickness of 900nm for the bottom cell. The J-V data for the a-Si:H cell shows a rather high V_{oc} of 0.90 V, which is attributed to the high band gap of the a-Si:H layer deposited at 130 °C. The characteristics of the curves, especially near V_{oc} , confirms that the tunnel recombination junction with the low temperature doped layers is working well, showing no S-character. The micromorph tandem cell has a V_{oc} of 1.40 V, a J_{sc} of 10.5mA/cm² and a FF of 65%, resulting in an initial efficiency of 9.5%.



Figur 12. XTEM image of the a-SiH/nc-SiH tandem solar cell, showing the ZnOAl TCO, a-SiH top cell and nc-SiH bottom cell. A clear boundary is visible where the tunnel recombination junction (TRJ) is between the a-SiH top cell and the nc-SiH bottom cell. The cells have total thicknesses of 285nm for the top cell and 960nm for the bottom cell.

Figure 12. shows a bright field cross-sectional transmission electron microscopy (XTEM) image of the complete cell structure showing the different layers. Analysis of the XTEM images shows a top cell thickness of 285 ± 10 nm and a bottom cell thickness of 960 ± 60 nm, including p- and n-layers. The deposition rates of the a-Si:H and the nc-Si:H i-layer are 0.22 nm/s and 0.51 nm/s, respectively, which results in a total deposition time for the i-layers of only 51 minutes. For the deposition of an a-Si:H/nc-Si:H tandem cells on polycarbonate we copied the recipe from the tandem cell on glass and performed a deposition run using different types of structured PC, as substrates in the stretch substrate holder. Figure 13. (left, solid) shows the J-V measurements under AM1.5 light conditions on the resulting cell on micro-structured PC. The high V_{oc} (1.58 V) and the very low current density (3.7 mA/cm^2) point towards an a-Si:H bottom cell, whereas for the same deposition run on a glass substrate, the bottom cell showed nc-Si:H behavior. The a-Si:H growth on PC substrates was confirmed by Raman spectroscopy measurements, shown in the inset, which indeed show only a very low Raman crystalline ratio (0.07), whereas the cell deposited on a glass substrate shows a Raman crystalline ratio of 0.47.



Figur 13. (left) J-V curves under AM1.5 light conditions of tandem cells deposited on micro-structured PC substrates, using two different hydrogen dilutions for the bottom cell i-layer. The inset shows Raman spectroscopy data on two bottom cell i-layers at $\text{FSiH}_4/\text{FH}_2 = 5/100$ on glass and on PC. (right) Spectral response data for the tandem cell deposited at the higher hydrogen dilution, showing the response of the top cell, the bottom cell and the response under dark conditions.

Consequently we deposited a tandem cell structure on different types of structured PC, but now changing the gas flows from $\text{FSiH}_4/\text{FH}_2 = 5/100$ to $\text{FSiH}_4/\text{FH}_2 = 4.5/100$. Figure 13. (left, dashed) shows the J-V curves of the resulting cell on micro-structured PC, showing a higher J_{sc} of 7.9 mA/cm^2 and a V_{oc} of 1.25 V, indicating that now the bottom cell is indeed nanocrystalline. Figure 13. (right) shows the spectral response curves for the same cell. The generated current

in the bottom cell is much lower ($6.9\text{mA}/\text{cm}^2$) than the current from the top cell ($8.2\text{mA}/\text{cm}^2$) and therefore the current in the cell is limited by the current generated in the bottom cell. For the cells deposited on both types of nanopyramid structured PC, the current generated in the bottom cells is lower, between 5.5 and $6\text{mA}/\text{cm}^2$, because the nanostructures are designed for light trapping in a-Si:H cells. For light trapping in the red and infra-red part of the spectrum, larger sized pyramids are needed. Coming back to our working a-Si/nc-Si tandem cell on micro-structured PC, the black line in Figure 13. shows the spectral response under dark conditions. The measured spectral response in the blue light region under dark conditions, which does not follow the spectral response of the bottom cell in this region, indicates that the bottom cell can conduct current even when it is not illuminated. When this happens, we say that the cell is leaking, which is probably due to low-quality nc-Si:H which can have shunt paths and/or a high midgap defect density in the layer, which has adverse effects on the V_{oc} and fill factor of the cell.

To obtain a better matching of the currents generated by the top and bottom cell we deposited new tandem cells, but now using a bottom cell i-layer thickness of 1350 nm , as opposed to the 900 nm used in the previous runs. It is also believed that a thicker bottom cell will reduce the leaking of the bottom cell. Figure 14. shows the J-V characteristics under AM1.5 illumination for three a-Si:H/nc-Si:H tandem cells: two cells deposited on micro-structured PC substrates, utilizing two different bottom cell thicknesses, and the tandem deposited on glass substrates (900 nm bottom cell). Figure 15. shows the corresponding spectral responses. Although the response of the bottom cell increases ($8.3\text{mA}/\text{cm}^2$) when a thicker bottom cell is used, the current of the complete cell is now limited by the top cell ($7.2\text{mA}/\text{cm}^2$). The lower current of the top cell is caused by a lower spectral response in the $350\text{-}500\text{ nm}$ region. This is probably due to a thicker p-layer or a less transparent TCO layer. Unfortunately, unforeseen circumstances prevented us from redepositing this run.

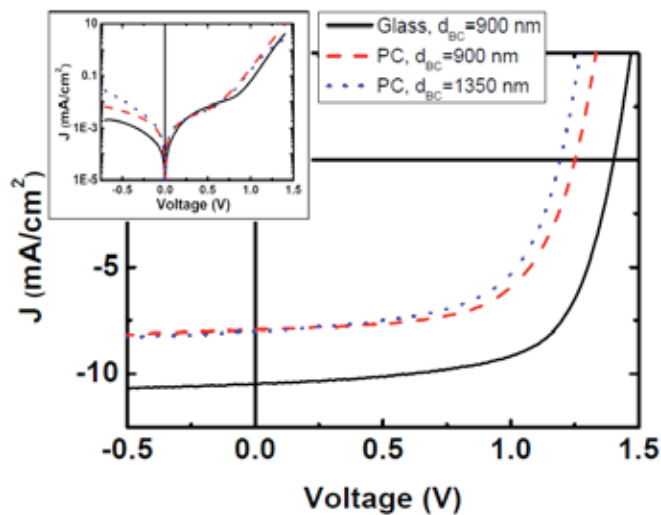
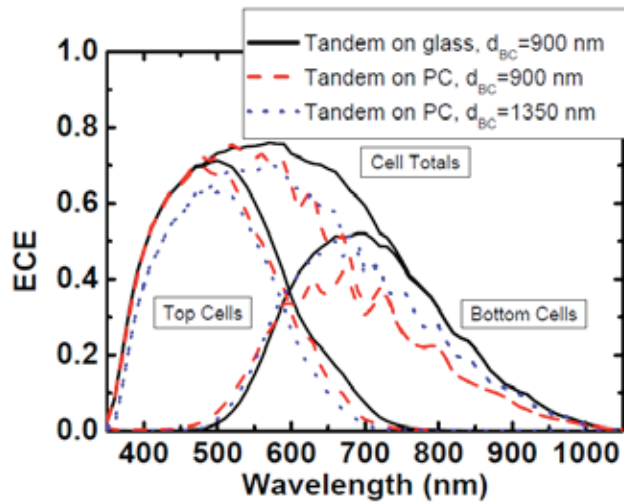


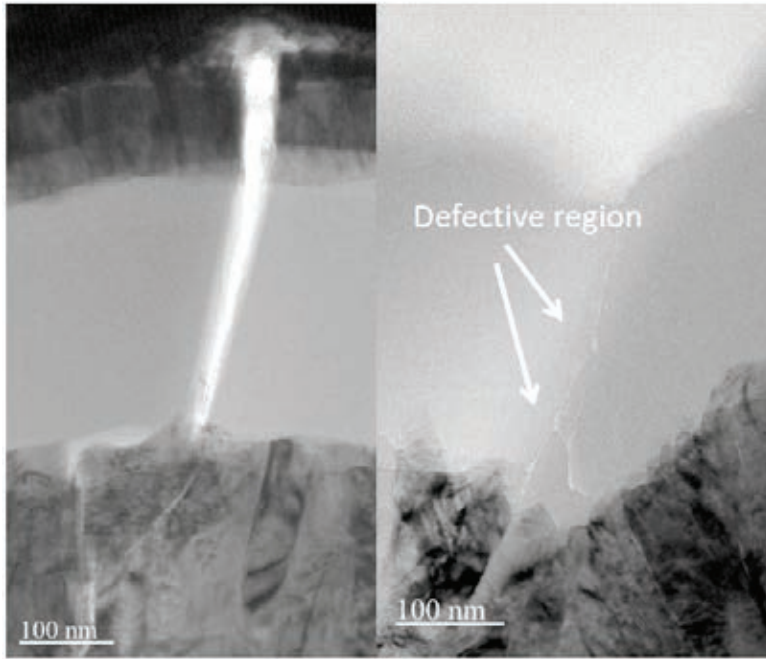
Figure 14. J-V measurements of tandem cells deposited on micro-structured PC, using two different bottom cell thicknesses. As a comparison, the data for a low temperature cell on glass (900 nm bottom cell) is also shown. The inset shows the corresponding dark J-V data.



Figur 15. Spectral response measurements on tandem cells deposited on PC, using two different bottom cell thicknesses. As a comparison, the data for the best low temperature tandem cell on glass in also shown.

2.4 Discussie

Although the silicon layers of the cells are made under identical deposition conditions on glass and PC, the qualities of the diodes differ. There are a few possible explanations for this. Firstly, defects could be created in the silicon due to the thermal expansion of the substrate, the coefficient of thermal expansion of PC, being much higher than that of amorphous silicon. This could result in external stress in the silicon layers and thereby induce defects in these layers. Secondly, controlling the substrate temperature is very important for obtaining good quality a-Si films. Although good quality films can be deposited even at room temperature, tuning of the hydrogen dilution is necessary to secure a device quality film. When depositing on plastic substrates, intrinsic stress of the layer on the substrate will cause curving of the substrate, resulting in a decrease in heat transfer from the heater to the substrate, which could result in a lower substrate temperature. Although our depositions were done in a specially designed substrate holder, which can compensate for the expansion by moving one end of the holder outwards by a pulling spring, when a layer is deposited which shows compressive stress, the bending of the substrate will cause a gap between the substrate holder and the substrate. Thirdly, studies have shown that the substrate morphology can have an influence on the defect formation during the deposition of a-Si. Defects are formed within the concave regions of the substrate. Similar defective regions were also found in nanocrystalline silicon thin films. Figure 16. shows cross-sectional transmission electron microscopy (XTEM) images of the cell on micropyramid structured PC, on which we can identify defective regions: On the left, we observe a complete crack through the silicon layers. On the right side, nanocracks (elongated voids) can be identified in the silicon layers near a valley in the TCO-silicon interface. This limits the attainable high efficiency on Micro-V PC substrates, though the present study shows highest efficiency reported so far on superstrate a-Si solar cell on cheap plastics.



Figuur 16. Cross-sectional TEM images of a-Si cells deposited on micropyramid structured PC substrates. On the left a crack through the complete cell is visible. On the right, defective regions are present in the shoulder of a pyramid.

Table 2. The efficiency of the a-Si solar cell made on Micro-V substrates in the present study compared to other reported superstrate a-Si solar cells on plastics reported in literature. D = Direct deposition, T = Transfer/Temporary substrate.

Cell type	Substrate	Source	Eff (%)
p-i-n (a-Si) D	PET 100°C	Univ. Stuttgart, Germany	4.9
p-i-n (a-Si) T	Polyester	Univ. Utrecht/Nuon, Netherlands	7.7
p-i-n (a-Si/nc-Si) T	Polyester	Hyet Solar	9.1
p-i-n (a-Si) D	PC 130°C	University Utrecht	7.4

The high efficiency tandem cell fabrication processing shows some very interesting results. The deposition time for all Si layers of the tandem cell is just over 80 minutes. The p- and n-layers were not optimized for deposition speed. Apart from the greatly reduced deposition time, reducing the thickness of the bottom cell has a number of advantages. First of all, it results in a decrease in material usage. Secondly, the thinner layers mitigate the deleterious effect of a relatively high defect density (resulting from deposition at lower than optimum temperature) on FF and Voc. Thirdly, thinner layers induce less stress on the substrate (confirmed from negligible curling of the foil after deposition), which is a very important property when using plastics as a substrate. Cost reduction (together with flexibility) is the main advantage of using plastics as a substrate material. Apart from the substrate, cost reductions can be achieved by speeding up the manufacturing process (throughput), i.e. reducing deposition times. This can be achieved by either increasing the deposition rate of the layers or by decreasing the thickness of the layers. In this study we have shown that excellent spectral splitting can be achieved in very thin micromorph tandem solar cells deposited at 130°. Because the low temperature a-Si:H has a high band gap of 1.9 eV, corresponding to light with a wavelength of 653 nm, the top cell will transmit more (red) light towards the bottom cell than an a-Si:H cell deposited at higher temperature, while the V_{oc} of the completed cell will rise. This results in the possibility to use a thinner bottom cell, both because there is more light available for the bottom cell and because of the lower current generated by the top cell. The resulting lower J_{sc} of the complete cell is partly compensated by the higher Voc. In our configuration, we achieved excellent current matching using a 275 nm thick a-Si:H top cell and a 900 nm thick nc-Si:H bottom cell.

When we compare the tandem cells deposited on PC to the cell on glass, we observe a lower current generated in the bottom cell. The low voltages for tandem cells on PC can be attributed to the leakage in the bottom cells. As opposed

to the a-Si:H cells, the micro-structured substrates do not exhibit light trapping comparable to texture-etched ZnO:Al in nc-Si:H cells. The tandem cells on micro-structured PC show a decrease in V_{oc} , compared to the cells on glass. When we look at the J-V curves measured under dark conditions, we see that the cell on glass has a lower diode quality factor n of 3.5, compared to the cells on PC (3.9) and a reverse saturation current of 9.1×10^{-10} A, which is about one order of magnitude lower than the cells deposited on PC. This indicates a lower material quality of the materials deposited on PC. A similar observation was made for a-Si:H single junction solar cells deposited on PC substrates. Further work is needed to address this issue to achieve high efficiency micromorph tandem solar cells on cheap plastics such as micro-V greenhouse materials.

2.5 Conclusie en aanbevelingen

We studied the light trapping in a-Si cells deposited on PC substrates using three different substrate structures: Asahi U-type, nanopyrramids and pyramids much larger than the wavelength of light. We have achieved an initial solar cell efficiency of 7.4% for a cell directly deposited on nanopyramid structured PC after annealing for 1 hour at 125 °C. Compared to cells on Asahi U-type, these cells show a slightly higher current density, but suffer from a lower V_{oc} . Cells on micropyramid structured PC had a maximum initial efficiency of 6.4% after annealing, which is lower due to a lower current and a lower fill factor. We presented nc-Si:H and a-Si:H/nc-Si:H tandem solar cells deposited on glass and on PC substrates. We optimized the nc-Si:H layer quality by tuning the hydrogen dilution when depositing the layer and were able to accurately control the Raman crystallinity ratio by changing the applied power into the plasma. These layers were used to fabricate nc-Si:H cells on glass substrates, which gave us good cell performance, using thin (700 nm) i-layers. Combined in an a-Si:H/nc-Si:H tandem cell structure, we were able to deposit a tandem solar cell at a substrate temperature of 130 °C with an (initial) conversion efficiency of 9.5%. Because the used silicon layers in this cell are rather thin, deposition times can be kept to a minimum, which results in a total deposition time for all silicon layers of 80 minutes, and less than an hour for the i-layers only. When this recipe was transferred to PC substrates, the crystal nucleation behaved differently, resulting in a-Si:H/a-Si:H tandem cells, which suffer from a very low current, due to bad current matching. Changing the hydrogen dilution solved this problem. The light trapping in structured PC substrates is less pronounced in the bottom cell, compared to texture etched ZnO:Al, which is used for light trapping in our tandem cells on glass. This led to a thicker bottom cell to obtain better current matching.

2.6 List of Publications

1. M.M. de Jong, J. de Koning, J.K. Rath and R.E.I. Schropp, Identification of various plasma regimes in very high frequency PECVD of amorphous and nanocrystalline silicon near the phase transition, Proceedings of the 25th EUPV SEC Conference, Valencia, Spain, 3149-3151, 2010.
2. M.M. de Jong, A. Mohan, J.K. Rath, and R.E.I. Schropp, Temperature dependence of the ion energy distribution in a hydrogen diluted silane VHF plasma, AIP Conference Proceedings, 1397, 411-412, 2011.
3. M.M. de Jong, J.K. Rath, R.E.I. Schropp, P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, J. Baggerman and C.J.M. van Rijn, Geometric light confinement in a-Si thin film solar cells on micro-structured substrates, Proceedings of the 26th EUPV SEC Conference, Hamburg, Germany, 370-372, 2011.
4. M.M. de Jong, J. De Koning, J.K. Rath and R.E.I. Schropp. An optical analysis tool for avoiding dust formation in very-high frequency hydrogen diluted silane plasmas at low substrate temperatures, Physics of Plasmas, 19, 020703, 2012.
5. M.M. de Jong, J.K. Rath, R.E.I. Schropp, P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, J. Baggerman, C.J.M.

- van Rijn and E.A.G. Hamers, A novel structured plastic substrate for light confinement in thin film silicon solar cells by a geometric optical effect, *Journal of Non – Crystalline Solids*, 358(17), 2308-2312, 2012.
6. M.M. de Jong, J.K. Rath and R.E.I. Schropp, Very thin micromorph tandem solar cells deposited at low substrate temperature, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1426, 45-49, 2012.
7. M.M. de Jong, J. Baggerman, C.J.M. van Rijn, P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, H.J. Holterman, J.K.Rath and R.E.I. Schropp, Scattering, diffraction and geometric light trapping in thin film amorphous silicon solar cells on plastic substrates, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1426, 155-160, 2012.
8. M.M. de Jong, P.J. Sonneveld, J. Baggerman, C.J.M. van Rijn, J.K. Rath and R.E.I. Schropp, Utilization of geometric light trapping in thin film silicon solar cells: Simulations and experiments, 2012, *Progress in Photovoltaics*.

3 Structureren van polycarbonaat (Aquamarijn)

3.1 Inleiding

3.1.1 Aanleiding

Binnen het project heeft Aquamarijn gewerkt aan de ontwikkeling van micro-V en micropiramide gestructureerde oppervlakken. Deze materialen hebben naar verwachting een hoge transparantie en kunnen worden toegepast als beglazing in kassen en voor efficiëntere zonnecellen. Aquamarijn heeft kopieën gemaakt van bestaande Micro-V materialen in PDMS voor de validatie van de optimale hoek voor maximale transmissie. Daarnaast zijn micropiramide structuren gemaakt met behulp microfabricatie-technologie en gerepliceerd in kunststoffen. De micro gestructureerde materialen zijn gebruikt door de projectpartners voor lichttransmissie metingen en depositie van dunnelaag zonnecellen op kunststof

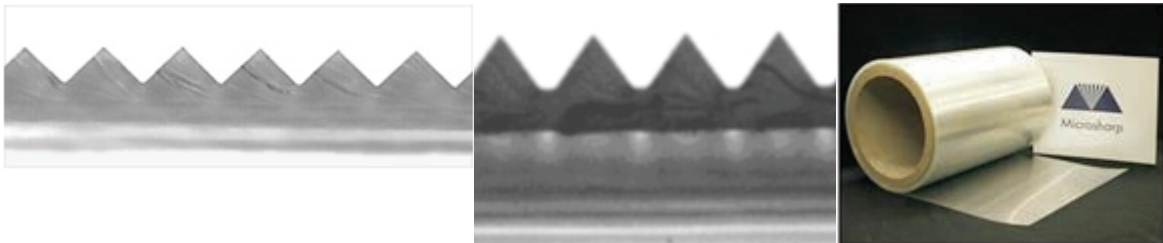
3.1.2 Doelstelling

Verkrijgen van optische materialen met microstructuren voor kassen en fotovoltaïsche cellen.

3.2 Resultaten en Discussie

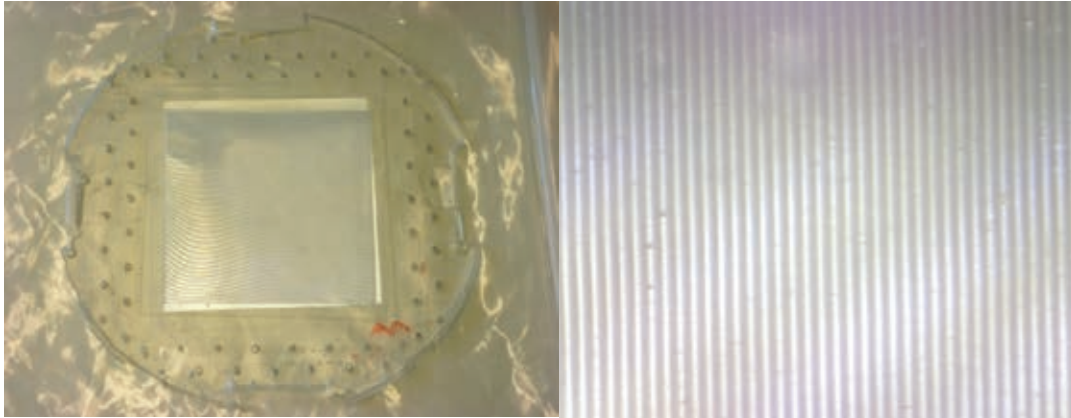
3.2.1 Micro-V

Micro-V materialen worden veelvuldig toegepast voor verbetering van de helderheid van LCD beeldschermen (bijv. de "Prism Brightness Enhancement Films" van 3M). Deze materialen zijn goed verkrijgbaar en waren het startpunt voor een verdere ontwikkeling van micro-V materialen. Een aantal monsters zijn verkregen van Microsharp (Figuur 1.).



Figuur 1. Films gemaakt door Microsharp met Micro-V structuren met verschillende tophoeken (90° en 70°).

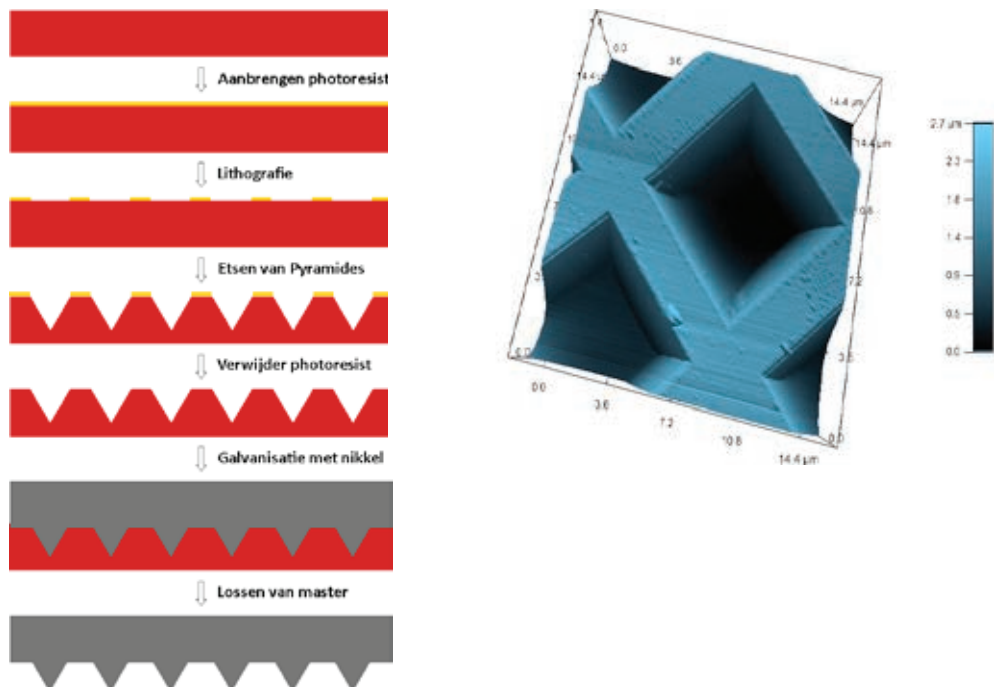
Met behulp van de beschikbare materialen van Microsharp zijn kopieën gemaakt van polydimethylsiloxaan (PDMS; Dow Corning Sylgard 184) met een grootte van 10 bij 10 cm (Figuur 2.)(Xia *et al.* 1998). PDMS is na curing een elastomeer en daarom is het mogelijk om door rek de hoek van de v-groef te variëren. Hiermee is geprobeerd de transmissie te bepalen als functie van de v-groef hoek. Het PDMS bleek in de praktijk echter snel te scheuren en niet goed toepasbaar. Hierom is later in project meer samengewerkt met Nanoptics voor het vervaardigen van Micro-V materialen.



Figuur 2. Kopie (links) van een Microsharp V-groef in PDMS en detail van V-groeven (rechts).

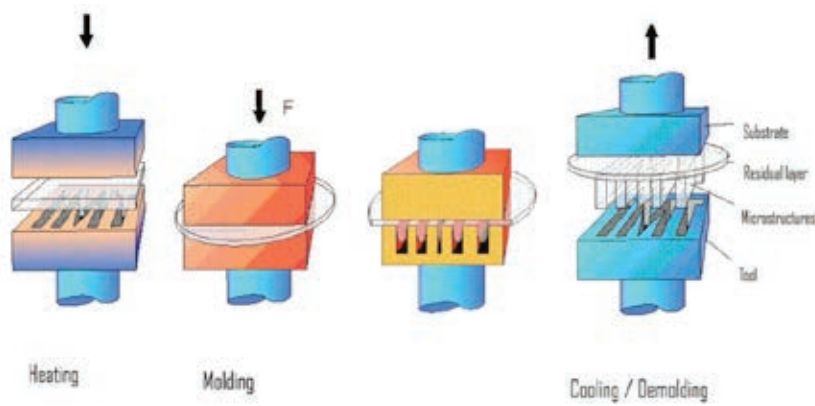
3.2.2 Micropiramides

Voor het vervaardigen dunne-laag zonnecellen met microstructuur is gekozen voor het maken van regelmatige micropiramides. Voor de vervaardiging van deze micropiramides in transparant kunststof is het LIGA proces gevolgd, wat staat voor Lithografie, Galvanisering en Afvorming. Het proces is schematisch weergegeven in Figuur 3. Met behulp van silicium microfabricatie technologie wordt de structuren aangebracht in een silicium wafer. Eerst wordt een foto-actieve laag aangebracht op een silicium wafer en met behulp van fotolithografie een raster patroon gecreëerd in de foto-actieve laag. Doormiddel van een ets-stap wordt vervolgens het silicium tussen het raster weggeëtsd. Het etsen verloopt anisotroop langs de kristalvlakken in het silicium waardoor er piramides ontstaan in de wafer (Figuur 3. rechts). Ten slotte wordt de microstructuur gekopieerd in nikkel door galvanisatie.

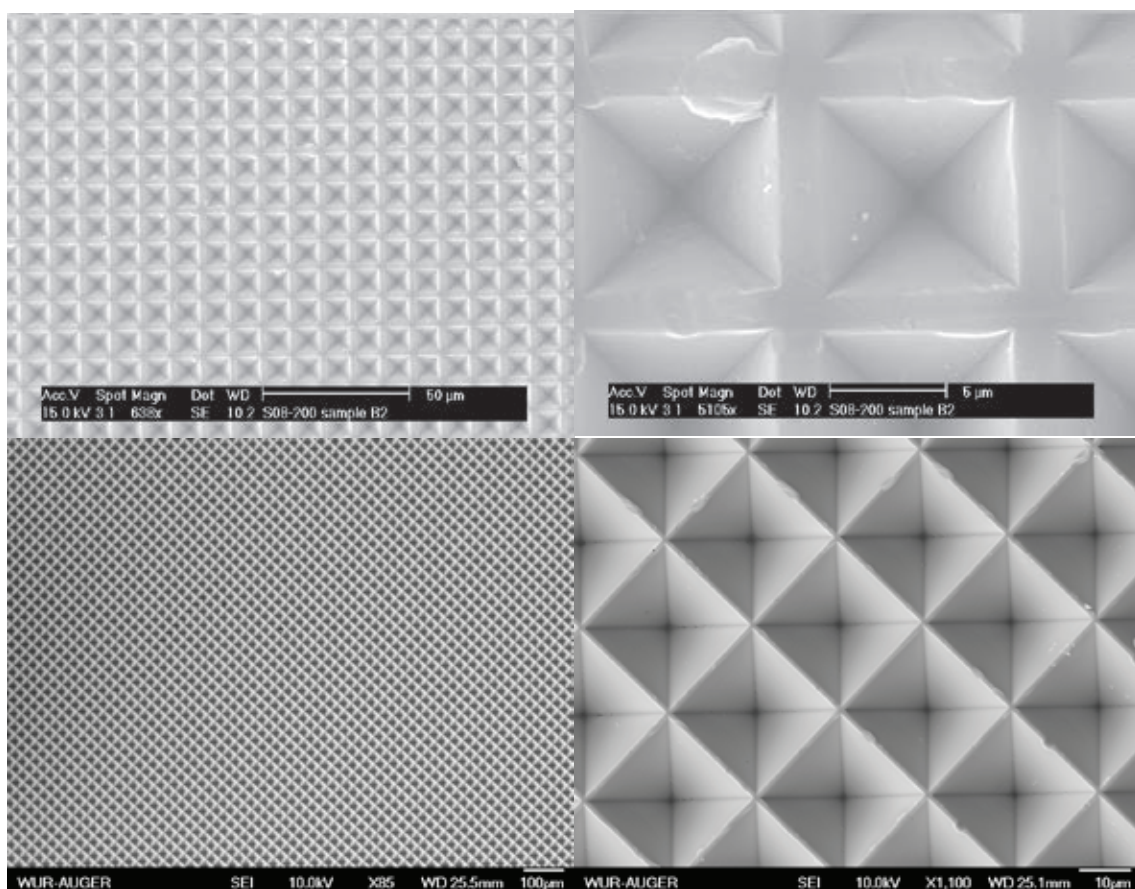


Figuur 3. Schematische weergaven van fabricage van nikkel master voor hot embossing (links) en een AFM beeld van de structuur in silicium (rechts).

Met behulp van de nikkel master zijn vervolgens met warm embossen de micropiramides in polycarbonaat kunststof gerepliceerd (Figuur 4.). Hiervoor wordt een vlak polycarbonaat substraat tussen de master en een vlakke plaat geklemde en in vacuüm verhit tot boven de glastransitietemperatuur van het polycarbonaat. Het polycarbonaat wordt bij deze temperatuur vervormbaar en door de druk neemt het de vorm van de nikkel master aan. Na afkoelen wordt het materiaal weer hard en kan de master worden verwijderd en heeft het polycarbonaat de een piramide structuur (Figuur 5.).



Figuur 4. Warm embossen van structuren in thermoplastische kunststoffen (Worgull et al. 2005).



Figuur 5. SEM foto's van micropiramides in polycarbonaat gemaakt met warm embossen.

3.3 Conclusies

Verschillende microstructuren voor verbeterde transparante materialen zijn succesvol gefabriceerd en gerepliceerd in kunststof. Deze materialen zijn door de project partners bestudeerd op optische eigenschappen. Met de vervaardigde micropiramides zijn succesvol substraten gemaakt voor deposities van dunne laag zonnecellen.

3.4 Referenties

Xia, Y. and Whitesides, G. M. (1998), Soft Lithography. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 37: 550-575

Worgull, M., Heckeke, M., and Schomburg, W. K. (2005)
Microsyst. Technol. 12: 110-115

Projectnummer: EOSLT07041
Projectperiode: 01-07-2008 – 01-07-2013

