

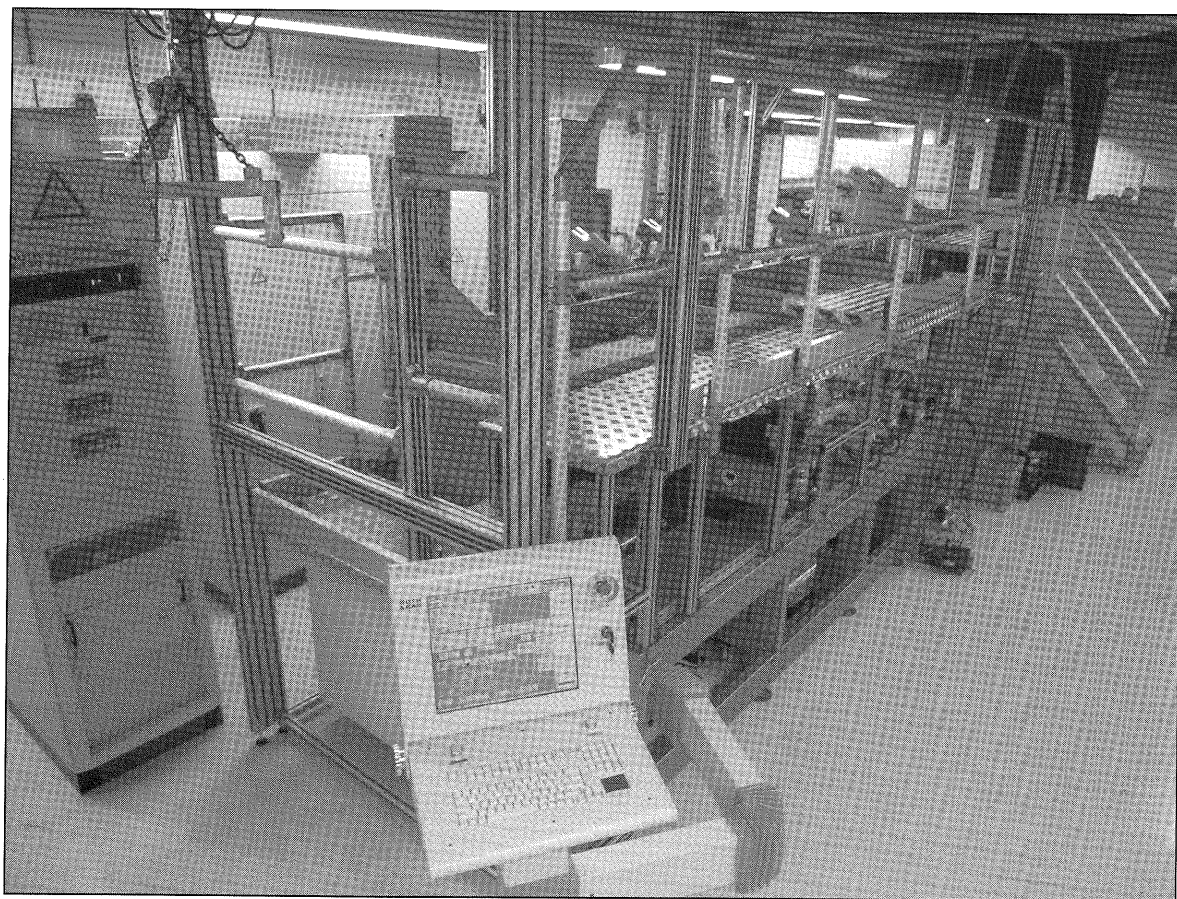
# De FLEXICOAT-300: een roll-to-roll PECVD systeem voor fabricage van dunne film silicium zonnecellen op folie.

Wim Soppe, Bas van Aken, Maarten Dorenkamper, Camile Devilee, Maurits Heijna en Jochen Löffler, Paul Pex.  
ECN Zonne-energie, Postbus 1, 1755 ZG Petten, Nederland.

De Flexicoat300 is een experimentele roll-to-roll opstelling van ECN, waarmee een nieuw fabricageproces van dunne film silicium zonnecellen op folie wordt ontwikkeld. In het systeem worden de actieve lagen van de zonnecellen geproduceerd door middel van een Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition proces.

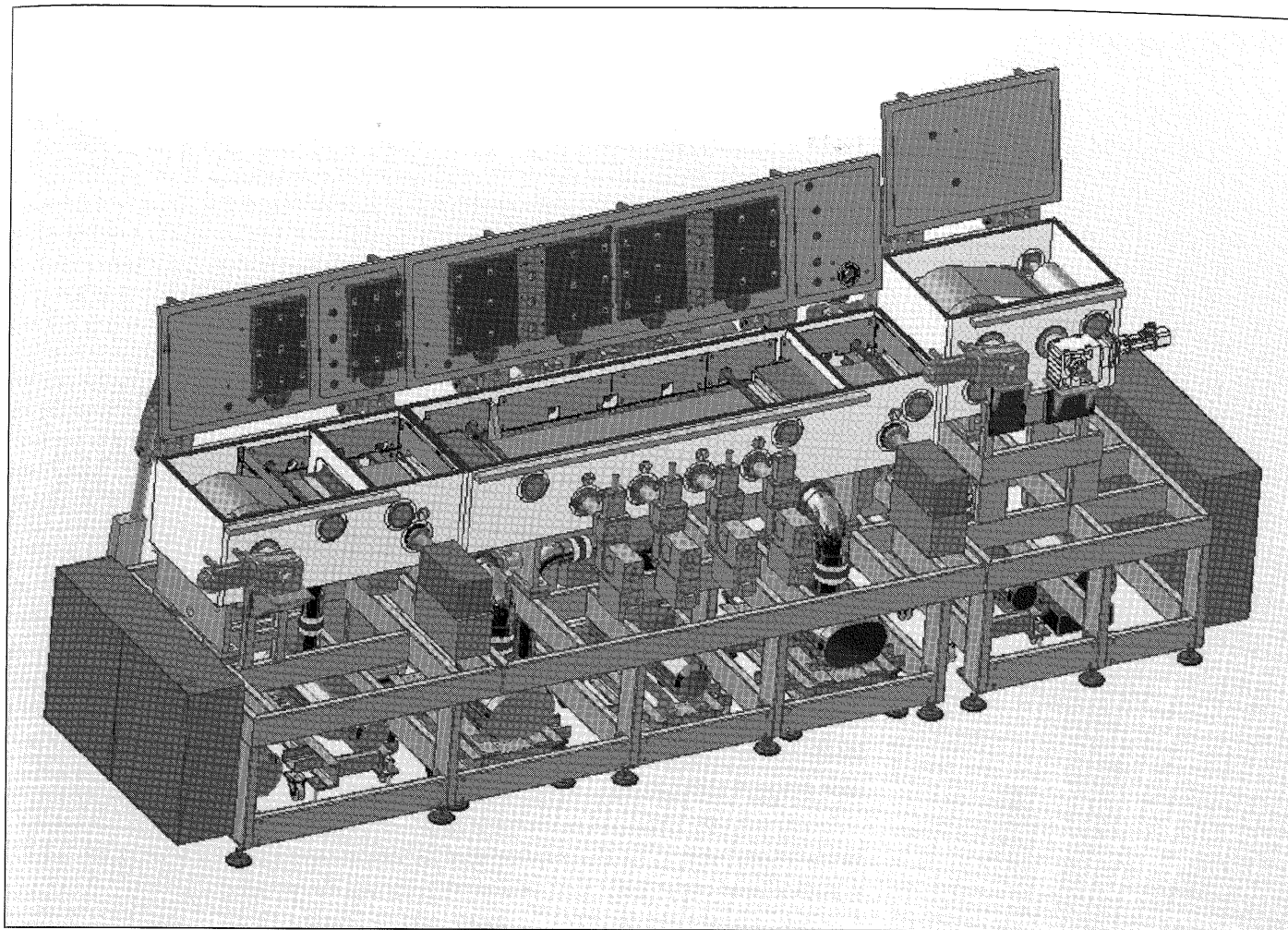
Het systeem heeft verschillende plasma depositiebronnen, elk met een specifieke taak in het fabricageproces. Voor de procesbewaking zijn verschillende middelen aanwezig zoals Optische Emissie Spectroscopie, Residual Gas Spectroscopie en Kelvin probe spectroscopie. In het systeem kunnen intrinsieke en gedoteerde; amorfe en microkristallijne siliciumlagen geschikt voor zonnecellen worden gedeponereerd. De eerste cellen die in het systeem zijn gemaakt hebben een rendement van ruim 8%.

In de afgelopen jaren is vraag naar en de productie van zonnecellen stormachtig gegroeid. Deze groei is mede mogelijk gemaakt door stimuleringsmaatregelen van overheden, met name in Duitsland en in Spanje, en heeft er toe geleid dat de kostprijs van foto-voltaïsche (PV) modules enorm gedaald is, van ongeveer 5 Euro/Wp<sup>1</sup> in 2000 tot minder dan 1 Euro/Wp nu. Als deze trend zich doorzet zal in Zuid-Europa over enkele jaren zgn. net-pariteit worden bereikt terwijl in NW-Europa, met z'n lagere hoeveelheden zonuren deze situatie in 2015-2020 zal worden bereikt. Net-pariteit wil zeggen dat voor consumenten de prijs



Figuur 1: foto van de Flexicoat-300 bij ECN.

<sup>1</sup> Het vermogen van een PV module wordt uitgedrukt in Wp: dit is het elektrisch vermogen dat een module onder ideale omstandigheden (volle zon en kamertemperatuur) kan genereren.



Figuur 2: opengewerkte tekening van de Flexicoat-300

van stroom die ze zelf opwekken met PV modules op hun dak even hoog is als de prijs die zij moeten betalen aan hun elektriciteitsleverancier. Net-pariteit zal dus voor een enorme extra impuls voor de toepassing van PV gaan zorgen omdat vanaf dat moment de consument dus - zonder overheids subsidie - goedkoper zelf z'n stroom kan produceren met z'n eigen PV modules dan te kopen bij z'n elektriciteitsleverancier.

Het is echter niet eenvoudig om de dalende trend van moduleprijzen ook in de komende jaren vol te houden. Hiervoor zijn significante reducties van de fabricagekosten van PV modules ten opzichte van de huidige stand van de techniek noodzakelijk. Naast verder schaalvergroting van de productie, is reductie van materiaalkosten een belangrijke route hier naar toe. De ontwikkeling van dunne film PV modules is hier bij uitstek op gericht.

In conventionele PV modules wordt het zonlicht in stroom omgezet in wafers van ultrazuiver silicium, met een dikte van 150 tot 200 micrometer. De materiaalkosten voor deze wafers vormen daarmee een

substantieel deel (ongeveer 1/3) van de totale kosten van de module. In dunne film PV modules zijn de absorberlagen typisch 300-1500 nanometer dik hetgeen dus tot enorme kostenbesparingen kan leiden, mits de verliezen in omzettingsrendement binnen de perken blijven.

Voor ECN, het nationale instituut voor energieonderzoek in Nederland, is het verder ontwikkelen van zonnecellen en modules, en het naar de markt brengen van deze technologieën een van de belangrijkste programmalijnen. Meer dan 80 onderzoekers werken er aan nieuwe technologieën voor zowel kristallijn silicium zonnecellen en modules als aan dunne film PV. In de groep dunne film PV werkt ECN onder andere aan een zonnecelconcept gebaseerd op amorf en microkristallijn silicium. De silicium absorberlagen worden met een Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) proces, in vacuüm, en bij relatief lage temperaturen (beneden 200 °C) gegroeid. Voor dit proces is een roll-to-roll PECVD systeem ontwikkeld en gebouwd en dit systeem zal hieronder verder worden besproken.

### De Flexicoat-300: gas- en vacuümsysteeme

De Flexicoat-300 is ontworpen samen met, en gebouwd door de Duitse firma Roth&Rau, en is geschikt voor depositie van siliciumlagen op folie, met een breedte van maximaal 300 mm.

Het systeem bestaat uit 5 afzonderlijke vacuümkamers: een afwikkelkamer en een oprolkamer aan de uiterste zijden en daartussenin drie kamers voor depositie van respectievelijk n-gedoteerde, intrinsieke en p-gedoteerde siliciumlagen.

Voor een goede werking van de zonnecellen is de zuiverheid van de intrinsieke siliciumlagen van het grootste belang. In deze lagen worden door invangst van fotonen elektron-gat paren gecreëerd. Om deze elektronen en gaten met een hoog rendement te kunnen collecteren moet de absorberlaag zo defect-arm mogelijk te zijn. Naast rooster/netwerkfouten zijn verontreinigingen, en dan met name zuurstof atomen, de belangrijkste bron van defecten in het silicium. Voor goed werkende zonnecellen

moet de zuurstofconcentratie in de silicium-lagen minder dan  $1\text{E-}19\text{ cm}^{-3}$  zijn; dit komt neer op ongeveer 200 ppm. Het is een flinke uitdaging om dergelijk lage concentraties te bereiken met een semi-industrieel productiesysteem. Zuurstofatomen worden namelijk heel gemakkelijk ingebouwd in silicium-lagen tijdens het PECVD proces en daarom eisen we dat de concentratie van zuurstof en water tijdens het depositieproces niet groter is dan 10 ppm.

Bij het ontwerp van de Flexicoat is hiervoor de volgende filosofie gevolgd. De mate van zuurstof-inbouw tijdens de deposities wordt niet zozeer bepaald door het voorvacuüm van het systeem, maar door de zuiverheid van de procesgassen en door inlek.

De strategie om de partiaaldrukken van zuurstof en waterdamp tijdens de deposities in de Flexicoat300 beneden de 10 ppm te houden is gebaseerd op een viervoudige aanpak:

1. een voordruk voor deposities lager dan  $1 \times 10^{-5}$  mbar;
2. spoelen van de kamers voorafgaand aan de deposities met zuiver  $\text{H}_2$ ;
3. leksnelheid voor alle kamers kleiner dan  $3.3 \times 10^{-9}$  l.bar/s;
4. gas zuiveraars die garanderen dat de concentratie van  $\text{O}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$  in de procesgassen minder dan 1 ppm is.

Het vacuüm in de kamers wordt gecreëerd door een set van droge pompen. Voor de grootste kamer (voor de deposities van de i-lagen) gebeurt dit met een combinatie van een Drystar Pump GV600 plus een Mechanical Booster Pump EH2600IND (BOC Edwards). Voor de kleinere kamers (voor de n- en p-lagen) gebeurt dit met een combinatie van een Drystar GV80 en een EH500IND. Hiermee worden in alle

depositiekamers drukken van minder dan  $5 \times 10^{-6}$  mbar bereikt. De afwikkel- en opwikkelkamer tenslotte worden afgepompt met scroll pompen van het type XDS35i. Hoewel deze pompen een einddruk hebben van  $10^{-2}$  mbar, wordt via de naastgelegen depositiekamers toch ook hier drukken van minder dan  $5 \times 10^{-6}$  mbar bereikt. De typische afpomptijden hierbij zijn 5-10 uur.

De procesgassen die gebruikt worden om intrinsiek silicium te groeien zijn silaan ( $\text{SiH}_4$ ) en waterstof. Teneinde de hoogst mogelijke zuiverheid te garanderen passen we MicroTorr gas reinigers van SAES toe. Deze reinigers garanderen dat het  $\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{O}_2$  gehalte in de procesgassen minder dan 1 ppb is.

Een dunne film silicium zonnecel bestaat echter uit meer dan alleen een laag van intrinsiek silicium. Voor de diodewerking zijn ook n- en p-type lagen nodig en daarnaast worden er verschillende tussenlagen toegepast om het elektrisch en/of het optisch gedrag van de cel te verbeteren. Voor het maken van dit soort lagen heeft de Flexicoat een uitgebreid gasdistributiesysteem waarbij naast  $\text{SiH}_4$  en  $\text{H}_2$  ook  $\text{PH}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , en Ar als procesgassen kunnen worden gebruikt. De Flexicoat heeft voor al deze gassen MicroTorr gasreinigers aan boord.

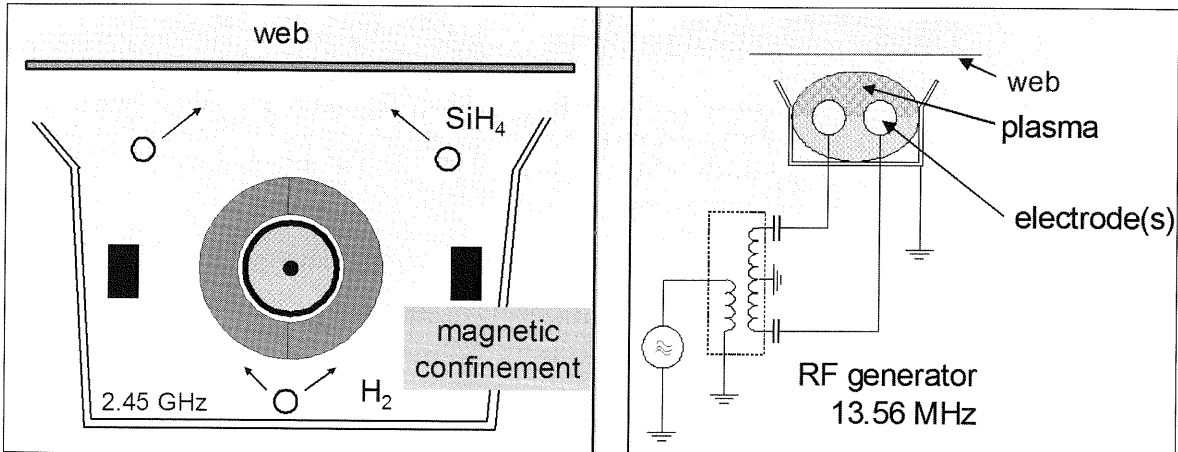
Voor een goede werking van de zonnecellen mogen de intrinsieke siliciumlagen ook niet verontreinigd worden met doteringsgassen uit de n- en p-kamer. Omdat het folie tijdens de deposities onbelemmerd van de ene naar de andere kamer moet kunnen rollen, hebben we dus speciale voorzieningen moeten treffen voor de overgangen tussen de kamers. Deze zgn. gassluizen zijn T-vormige overgangen tussen de kamers waarbij het

folie door de armen van de T loopt en in de romp een schutgas kan worden ingelaten. Aan de onderkant van de T tenslotte, wordt het schutgas weer afgepompt. Deze gassluizen garanderen dat de verhouding tussen de partiaaldruk van doteringsgassen en de procesdruk in de i-kamer kleiner dan  $1 \times 10^{-6}$  is. De typische procesdrukken liggen overigens in het gebied van 0.05 tot 1 mbar en worden geregeld met vlinderkleppen.

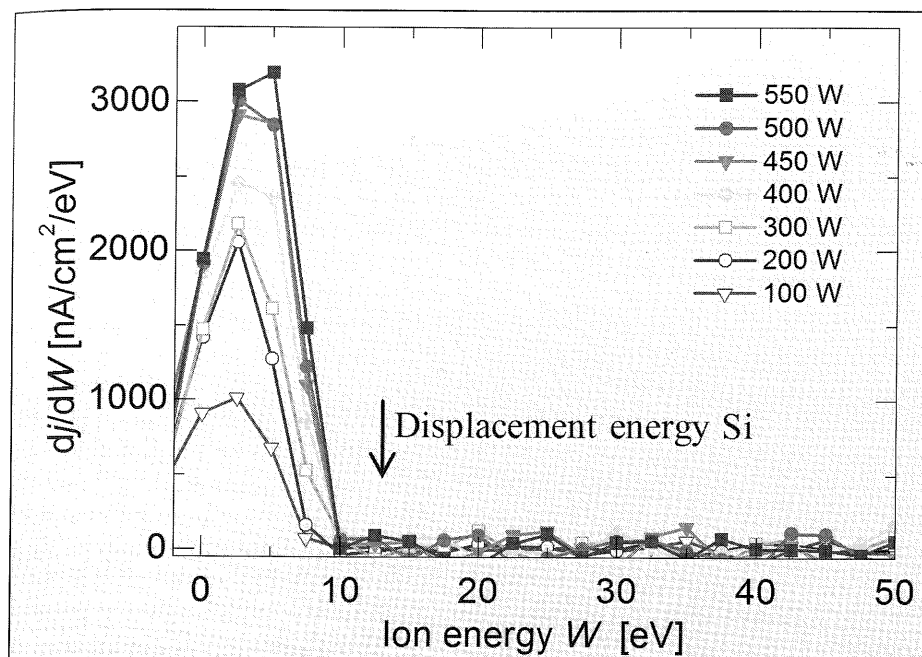
### De plasmabronnen

De Flexicoat300 is voorzien van drie types plasmabronnen. Voor de depositie van gedoteerde lagen in de n- en p- kamer worden lineaire Radio Frequency (RF), bronnen gebruikt die opereren bij een frequentie van 13,56 MHz. Voor depositie van intrinsiek silicium wordt geëxperimenteerd met twee verschillende type bronnen: een lineaire microgolf (MW) bron ontwikkeld door Roth&Rau [1] en een lineaire Very High Frequency (VHF) bron ontwikkeld door FAP [2]. De Flexicoat300 is het eerste systeem waarin de lineaire RF bron en de lineaire MW bron worden toegepast voor fabricage van dunne film silicium zonnecellen. Ze hebben allebei gemeen dat het zgn. remote plasma bronnen zijn. Dit betekent dat het substraat elektrisch ontkoppeld is van de plasmaopwekking en dit biedt een grotere vrijheid bij de substraatkeuze. Een ander voordeel van "remote" plasma is de lage ionenenergie. Dit voorkomt dat tijdens depositie deeltjes met grote kinetische energie op het substraat botsen en bestaande lagen beschadigen.

De lineaire VHF bron is een capacitief-plasma bron. Het plasma wordt hier opgewekt tussen twee platen: een VHF elektrode en een gearde elektrode. Het substraat ligt tegen de gearde elektrode aan (of in het geval van staalfolie als substraat vormt het



Figuur 3: dwarsdoorsneden van de lineaire microgolf bron (links) en de lineaire RF bron (rechts).



Figuur 4: Verdeling van de ionen-energie voor een H<sub>2</sub> plasma als functie van het vermogen, in de lineaire RF bron.

zelfs de tegenelektrode) en is daarmee dus elektrisch gekoppeld aan het plasma. De hoge frequentie van de VHF bron (60 MHz) zorgt er echter voor dat ook in dit geval de energie van de ionen die op het substraat arriveren laag is en geen schade aan de reeds gegroeide laag kunnen aanrichten.

Het werkingsprincipe van de capacitieve VHF-bron staat in verschillende tekstboeken beschreven [3,4]. De lineaire RF en MW bron verdienen echter een nadere toelichting. In onderstaande figuur zijn de dwarsdoorsneden van de twee "remote" bronnen weergegeven.

De geometrie van beide bronnen is grotendeels gelijk waardoor ze in principe uitwisselbaar zijn. Meer specifieke eigenschappen van de twee bronnen zijn:

- De microgolffron heeft één antenne: een koperen buis met een doorsnede van ongeveer 5 mm. In de dwarsdoorsnede is deze antenne als een zwarte stip in het midden weergegeven. De antenne wordt aan voor- en achterzijde gevoed met microgolff vermogen dat via een waveguide in de antenne wordt ingekoppeld. Elke bron heeft hiervoor zowel aan de voorzijde als aan de achterzijde een microgolffgenerator (2,45 GHz) met een vermogen van 2 kW. De antenne wordt beschermd door een kwartsbuis met een doorsnede van ongeveer 3 cm. In deze buis wordt lucht geblazen om buis en antenne af te koelen (dit is het blauwe gebied in Figuur 3a). Buiten de buis is de druk voldoende laag om een gasontlading te realiseren. Het resulterende

plasma (met rood aangegeven in Figuur 3), is zgn. "surface wave sustained" en heeft de grootste dichtheid vlak bij de buis [5,6]. Typische plasmadichtheden dicht bij de buis zijn in de orde van  $10^{17}$  tot  $10^{18}$  m<sup>-3</sup>. De microgolffron heeft aan weerszijden van de buis twee lineaire arrays van magneten. Deze magneten bewerkstelligen een lokale opsluiting van elektronen, en zorgen voor een hogere plasmadichtheid bij het substraat en daarmee een grotere depositiesnelheid. Tenslotte is te zien dat de procesgassen H<sub>2</sub> en SiH<sub>4</sub> op verschillende posities worden binnen gelaten. Het SiH<sub>4</sub> wordt zo dicht mogelijk bij het substraat binnen gelaten om parasitaire depositie van silicium op de wanden en de kwartsbuis zo gering mogelijk te maken.

- De RF bron heeft twee buisvormige elektrodes. De elektrodes zijn symmetrisch verbonden met de RF generator, dus beide elektroden zijn 180 graden uit fase. Het elektrisch veld tussen deze twee elektroden genereert een capacitief plasma, dat zich bij de gebruikte procesdrukken (0.05 tot 1 mbar) ook uitbreidt rondom de elektrodes. Ook bij deze bron wordt het H<sub>2</sub> gas dicht bij de elektrodes ingebracht, en het SiH<sub>4</sub> dicht bij het substraat.
- De MW- en de RF-bron hebben als gemeenschappelijk kenmerk dat ionenenergieën van de deeltjes die op het substraat arriveren erg laag is. In Figuur 4 zijn de ionenenergieën voor de RF bron weergegeven voor typische condities waaronder

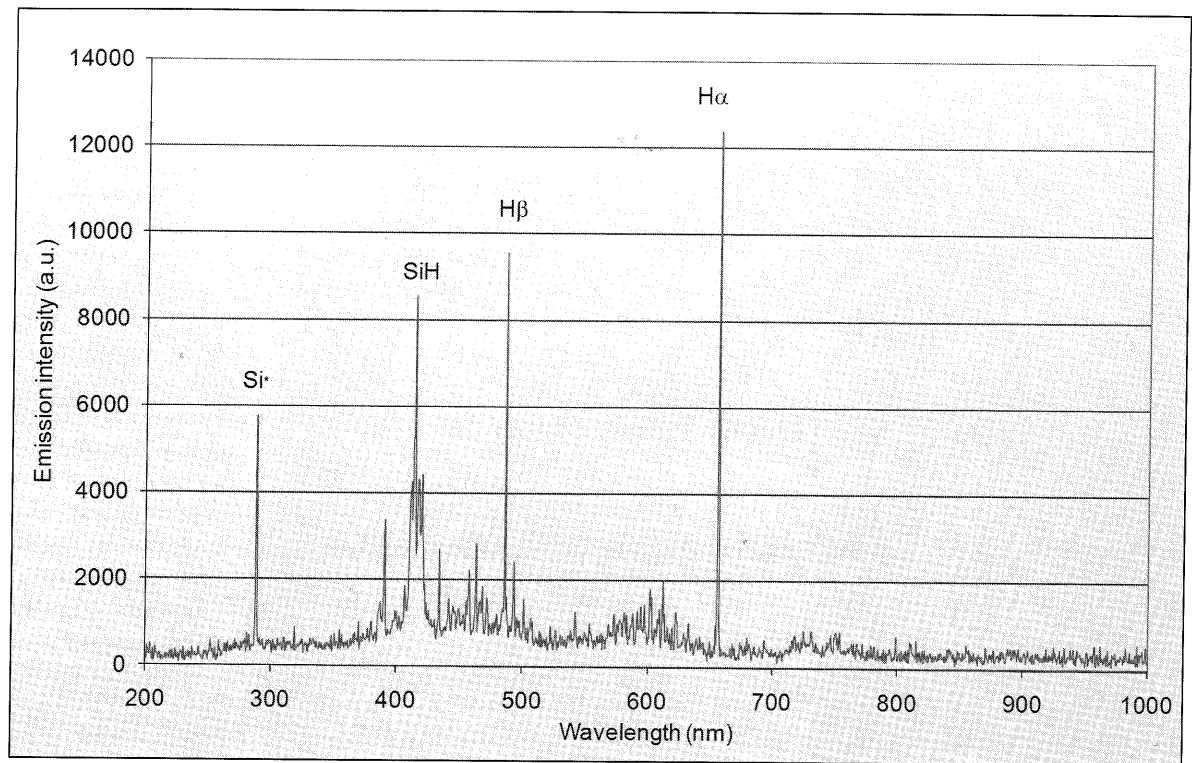
de bron bedreven wordt. We zien dat de ionenenergie altijd lager is dan 10 eV. Hetzelfde geldt voor de MW bron. Dit is een zeer gunstige eigenschap van deze "remote" bronnen want het betekent dat er geen plasmaschade aan het substraat en de groeiende lagen zal ontstaan. De verplaatsingsenergie van atomen in kristallijn silicium is namelijk ongeveer 15 eV.

### Inline diagnostiek

De Flexicoat is ontworpen als een pilot-systeem voor continue, inline depositie van n,i en p-type siliciumlagen. Om de kwaliteit van het proces te bewaken zijn er verschillende monitoring systemen ingebouwd:

- Alle procesparameters (drukken, flows, plasma-generatorvermogen, gereflecteerd vermogen, temperaturen) in alle kamers wordt continue gemonitord en op harde schijf opgeslagen.
- Residual Gas Analysis (RGA). Aan de Flexicoat is een Inficon TWare32 Single Sensor quadrupool massaspectrometer gekoppeld. Deze RGA wordt gebruikt om het voor-vacuüm, voorafgaand aan de deposities, te testen en om de scheidende werking van de gassluizen te controleren. Vanwege snelle vervuiling van de massaspectrometer door siliciumafzetting wordt de RGA niet gebruikt tijdens de deposities zelf.
- Optische emissie spectroscopie (OES). De aangeslagen deeltjes in het plasma zenden bij terugval naar de grondtoestand fotonen uit. We meten de optische emissie van het plasma met een eenvoudige spectrometer in het gebied tussen 200 en 1000 nm. In Figuur 5 staat een typisch OES spectrum van een SiH<sub>4</sub> plasma weergegeven. Gemarkeerd zijn twee Balmerlijnen van waterstof: H $\alpha$  en H $\beta$  en twee emissielijnen van silaanradicalen SiH\* en Si\*. Deze vier lijnen geven een goede indicatie van de toestand van het plasma en van de plasmageneratoren en worden daarom continue gemonitord. De verhouding H $\alpha$  / H $\beta$  is een maat voor de elektronentemperatuur in het plasma en daarmee een maat voor de stabiliteit van het ingekoppelde elektromagnetisch vermogen. De verhouding tussen (bijvoorbeeld) SiH\* en H $\alpha$  is een maat voor de verhouding tussen de SiH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub> debieten en daarmee een controle op de stabiliteit van de mass flow controllers en de drukregelaars.
- Kelvin probe monitoring. Een Kelvin probe (KP) meting is een contactloze methode





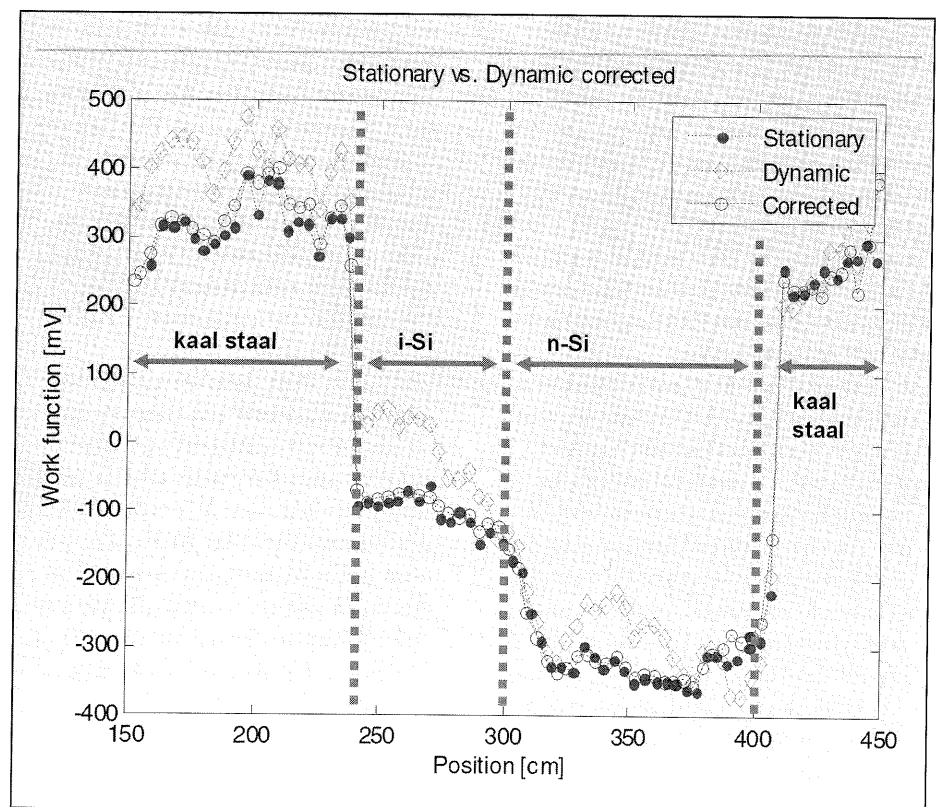
Figuur 5: Optische emissiespectrum van een microgolflasma van  $\text{SiH}_4$ .

om de elektrische oppervlaktespanning van een substraat te bepalen. Het is in feite een capacitieve meting waarmee het verschil tussen de werkfuncties van een substraat en een (vibrerende) probe wordt gemeten. Door het substraat te belichten kan ook de oppervlakte foto-spanning (surface photo voltage = SPV) worden bepaald. Wij hebben aangetoond dat deze SPV gecorrigeerd is aan de open klem spanning van a-Si zonnecellen [8]. Daarmee is KP monitoring dus een goede controle voor de kwaliteit van de gedeponeerde siliciumlagen in de Flexicoat. Wij hebben een in-situ KP van KP-Technologies ingebouwd in de opwikkelkamer van het systeem. In Figuur 6 staat een voorbeeld van in-situ monitoring van een silicium-laag gemaakt in de n-kamer, die in het begin intrinsiek is en waar in de loop van het proces in toenemende mate fosfor is toegevoegd. Het meetsignaal van de Kelvin probe is erg gevoelig voor de afstand tussen probe en folie en door de KP metingen hebben we gemerkt dat de opwikkelrol, ten opzichte waarvan de KP meet, niet 100% cilindrisch is. We moeten het KP signaal dus corrigeren voor periodieke veranderingen tussen probe en folie die hiervan het gevolg zijn. Na deze correctie vallen de inline metingen precies overeen met de statische in-situ metingen die na afloop ter controle zijn uitgevoerd. Het effect van de fosfordotering op de werkfunctie van de siliciumlaag is nu

duidelijk te onderscheiden en de metingen laten zien dat in-situ KP metingen een waardevolle kwaliteitscontrole voor de gedeponeerde siliciumlagen kunnen zijn.

#### Depositie van intrinsiek en gedoteerd silicium

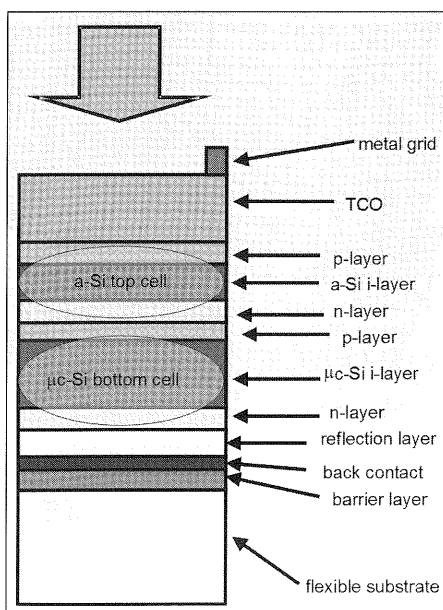
In de Flexicoat kunnen intrinsieke en gedoteerde siliciumlagen gemaakt worden en



Figuur 6: In-situ monitoring van de werkfunctie van een siliciumlaag gegroeid in de Flexicoat. 150-240 cm: kaal staal. 240-300 cm: intrinsiek silicium; 320-400 cm: n-type silicium gegroeid met toenemende  $\text{PH}_3$  toevoer; 400-450 cm (!): kaal staal.--

dan zowel amorf als microkristallijn. Amorf silicium heeft als voordeel dat het heel effectief licht absorbeert en dat het relatief snel groeit, maar heeft als nadeel dat het geen licht absorbeert in het rood en het infra-rood en dat de lagen heel dun moeten zijn om een effectieve collectie van de gegenereerde ladingsdragers mogelijk te maken. De rendementen van amorf silicium zonnecellen zijn daarom lager dan die van conventionele kristallijn silicium zonnecellen. Microkristallijn silicium is een materiaal dat net als a-Si met behulp van PECVD bij lage temperaturen gemaakt kan worden. Het materiaal bestaat uit kleine korrels (10-50 nm) kristallijn silicium ingebed in een matrix van amorf silicium. Dit materiaal heeft de opto-elektronische eigenschappen van kristallijn silicium en absorbeert dus wel in het rode en infrarode golflengte gebied. De lichtabsorptie is net als voor kristallijn silicium echter ook zwakker dan voor amorf silicium en daarom moeten er vrij dikke lagen worden gebruikt om al het zonlicht in te vangen. Als we beide absorberlagen echter combineren, zoals in de micromorfe tandemcel, dan ontstaat er een nagenoeg ideale structuur voor een hoogrendement dunne film zonnecel.

Deze structuur, die ook de toepassing is waar we bij ECN aan werken, staat schematisch weergegeven in Figuur 7. In zo'n tandemcel komen dus zes verschillende siliciumlagen: een bodemcel bestaande uit een micro-kristallijne n, i en p-laag en een top-



Figuur 7: Opbouw van een micromorf silicium tandemcel op folie.

cel bestaande uit een amorf n, i en p-laag.

De gedoteerde lagen worden gemaakt met de lineaire RF-bronnen. De taak van deze lagen is om een elektrische veld in de cel te genereren en om de gegenereerde ladingsdragers af te voeren. Daarom moeten deze lagen zo geleidend en transparant mogelijk zijn. n-type lagen worden meestal gemaakt door een fosforhoudend gas aan het SiH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub> mengsel in de depositiekamer toe te voegen. Gewoonlijk wordt hiervoor een mengsel van PH<sub>3</sub> in waterstof met een concentratie van 1-5% gebruikt. Voor de p-type lagen wordt een gewoonlijk boorhoudend gas gebruikt om de dotering te bewerkstelligen. De twee meest-gebruikte kandidaten hiervoor zijn B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> en TMB (TriMethyl-Boor); beiden ook meestal in een 1-5% verdunning in H<sub>2</sub>. TMB heeft als voordeel dat het thermisch stabiel is dan B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Laatstgenoemde gas kan thermisch ontleiden op hete plekken in de reactor (bijvoorbeeld op de verwarmingselementen) en daarmee in de loop van de tijd een oncontroleerbare bron van boor in de reactor worden. TMB heeft weer als nadeel dat bij de plasmaontleding ook koolstof ontstaat dat ingebouwd zal worden in de lagen.

Voor zonnecellen is de transparantie van de p-lagen erg belangrijk. Om de transparantie van de lagen te verbeteren wordt vaak koolstof aan de lagen toegevoegd, door CH<sub>4</sub> in het plasma bij te mengen. Koolstofinbouw zorgt voor een grotere bandgap van het materiaal, en daarmee voor een betere transparantie, maar zorgt voor een vermindering van de elektrische geleiding. In de praktijk moet dus altijd naar een zeker optimum tussen geleiding en transparantie worden gezocht.

Microkristallijn silicium is van nature veel transparanter dan amorf silicium maar hier frustreren booratomen de kristalgroei veel sterker dan fosforatomen, zodat ook het groeien van dunne lagen p-type microkristallijn silicium niet eenvoudig is.

De lineaire RF bronnen blijken echter goed te voldoen voor het groeien van gedoteerde lagen. In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de eigenschappen van de p-lagen die met deze bron in de Flexicoat zijn gemaakt. We zien dat de a-SiC lagen meer transparant zijn maar minder goed geleiden dan de a-Si p-lagen. De verhouding geleiding/transparantie in de SiC lagen kan gemanipuleerd worden door de verhouding B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/CH<sub>4</sub> te variëren.

In de praktijk blijken de lagen zoals wij die hebben ontwikkeld (en weergegeven in onderstaande tabel), goed te voldoen aan de eisen die gesteld worden voor het maken van state of the art zonnecellen

| parameter                 | μc-Si:H            | a-Si:H             | a-SiC:H            |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| σd [S/cm]                 | 6×10 <sup>-1</sup> | 3×10 <sup>-4</sup> | 5×10 <sup>-7</sup> |
| E <sub>act</sub> [eV]     | 0.06               | 0.19               | 0.40               |
| E <sub>g</sub> [eV]       | Nvt.               | 1.74               | 1.91               |
| α [104 cm <sup>-1</sup> ] | 1.2                | 2.4                | 2.1                |
| φ <sub>c</sub> [%]        | 55                 | nvt                | nvt                |
| rd [Å/s]                  | 0.34               | 0.51               | 0.71               |

Tabel 1: overzicht van de belangrijkste eigenschappen van p-lagen gemaakt met de RF bronnen in de Flexicoat. Achtereenvolgens worden de geleiding (σ), de activeringsenergie voor de geleiding E<sub>act</sub>, de optische bandgap E<sub>g</sub>, de absorptie (α) bij 600 nm, de kristalfractie, de groeisnelheid weergegeven voor een laagdikte van ongeveer 200 nm.

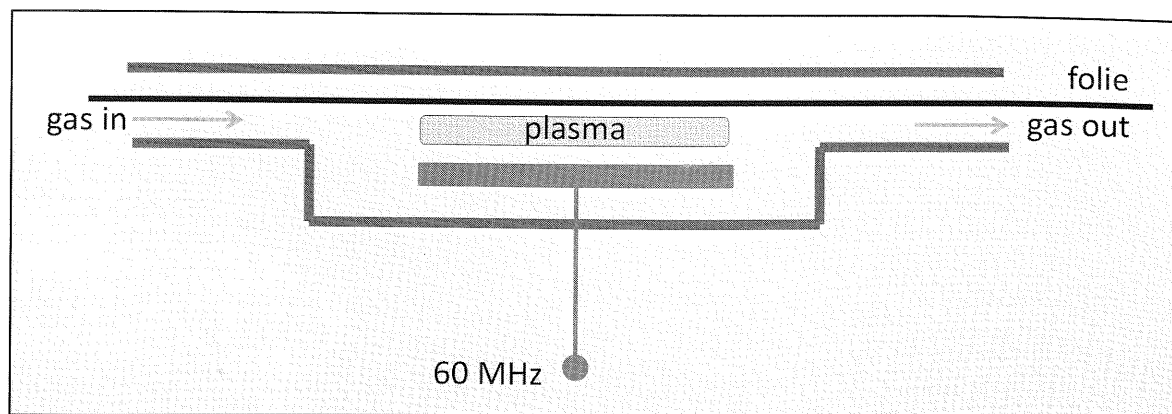
De intrinsieke silicium lagen kunnen in de Flexicoat worden gegroeid met MW bronnen en met de VHF bron. Vooralsnog zijn de beste intrinsieke lagen gemaakt met de VHF bron. Hiermee zijn we in staat om dynamische manier (dwz met een bewegend substraat) zowel amorf als microkristallijne silicium lagen van uitstekende kwaliteit te maken.

Door de specifieke configuratie van zijn gastoevoer en afvoer (zie ook Figuur 8) is de verhouding van de gasconcentraties in de lengterichting van de VHF-bron niet homogeen, maar vertoont een lineair profiel van inlaat- naar uitlaat-richting<sup>10</sup>.

Dit is met name het geval voor depositie van microkristallijn silicium waar gewerkt wordt met een mengsel van weinig SiH<sub>4</sub> en veel H<sub>2</sub>. Door de depositie wordt het SiH<sub>4</sub> in grote mate en het H<sub>2</sub> in kleine mate geconsumeerd zodat bij de inlaat de SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> verhouding groter is dan bij de uitlaat van de bron. In een statische depositie is daarom de kristalfractie in de laag lager bij de inlaat dan bij de uitlaat van de processgassen. In een dynamische depositie, (dwz met bewegend folie), doorloopt het folie dus verschillende depositieregimes en is het gunstig om het folie aan de uitlaatzijde de bron binnen te laten komen omdat daar de beste condities voor kiemvorming van microkristallijn silicium zijn.

## Celresultaten

In de huidige configuratie is de Flexicoat nu ongeveer een half jaar operationeel en we hebben ons in deze beginperiode vooral ge-



Figuur 8: Schematische weergave van de configuratie van de VHF bron.

richt op het maken van kleinere cellen. We hebben hiervoor een speciale samplehouder ontworpen en gemaakt die aan het transportfolie wordt gehangen en waarin kleine strookjes folie-substraat door het hele systeem kunnen worden gevoerd. De strookjes zijn typisch  $10 \times 3 \text{ cm}^2$  en hierop maken we tientallen kleine cellen van  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  en  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ . Op deze manier kunnen we snel en effectief de depositieprocessen optimaliseren alvorens over te gaan naar cel-fabricage op de volle breedte van het folie. De celopbouw is vooralsnog single-junctie, dus een stapeling van een enkele n, i en p-laag op het substraat. Het substraat bestaat uit staalfolie met daarop een isolerende lak. Deze laklaag kunnen we door middel van nano-imprint een textuur geven die ervoor zorgt dat het licht dat niet in de eerste doorgang is geabsorbeerd en de achterzijde van de cel bereikt, wordt verstrooid zodat het bij de volgende doorgang alsnog wordt geabsorbeerd. Een dergelijke lichtopsluiting is van groot belang om een hoog rendement van de cellen te bereiken<sup>11</sup>.

De ontwikkeling van microkristallijne cellen is op het moment van schrijven nog in volle gang maar de resultaten van de eerste a-Si cellen zijn zeer bemoedigend. De toepassing van de achterzijdetextuur maakt het mogelijk om een zeer effectieve lichtopsluiting te realiseren waardoor de cellen veel stroom genereren. We hebben a-Si cellen met een absorberlaagdikte van 350 nm gemaakt, die  $18 \text{ mA/cm}^2$  genereren en dat is een heel goede prestatie<sup>12</sup>. De omzettingsrendementen van deze cellen is ruim 8%.

### Vooruitzichten

De markt voor zonnecellen en -modules zal in de komende jaren nog enorm groeien. Het grootste marktaandeel zal (voorlopig?) nog zijn weggelegd voor producenten van cellen gebaseerd op kristallijn silicium wafers maar producenten van dunne film zon-

necellen zullen hun marktaandeel kunnen vergroten mits zij kunnen concurreren op de twee hoofdaspecten: kosten en betrouwbaarheid. Op het gebied van betrouwbaarheid heeft dunne film silicium PV een zeker voordeel ten opzichte van andere dunne film concepten door de decennialange ervaring die er ondertussen is opgebouwd met deze technologie. Op het gebied van kosten is de concurrentie de afgelopen jaren erg zwaar geworden voor de producenten van dunne film PV op glas. Hier is echter met roll-to-roll processing nog aanzienlijk winst te boeken. ECN heeft hieraan uitgebreide Cost-of-Ownership en CAPEX berekeningen gedaan en aannemelijk gemaakt dat dunne film silicium zonnecellen op folie tegen een aanmerkelijk lager kosten niveau geproduceerd kunnen worden dan de huidige zonnecellen. Belangrijk is dan wel dat de omzettingsrendementen van de cellen en modules op hetzelfde niveau komt te liggen als dat van de concurrerende technologieën (CIGS en CdTe); dat wil zeggen: 12% en meer.

De teloorgang van Helianthos heeft deze noodzaak helaas nog eens extra onderstreept. Benodigde ingrediënten voor celrendementen van 12% en meer zijn verdere verbetering van de lichtopsluiting en verbeterde absorberlagen en interfaces tussen de lagen. Silicon-Light<sup>13</sup>: een door de EU gefinancierd onderzoeksproject, dat geleid wordt door ECN, richt zich met name op deze twee onderwerpen en zal een belangrijke stimulans voor deze ontwikkelingen zijn. In 2012 zullen de dunne film PV activiteiten van ECN verhuizen van Petten naar Eindhoven en daar onder de vlag van Solliance worden gebundeld met andere dunne film zonnecelactiviteiten van Holst, TNO, TU/e en imec. We verwachten dat deze samenwerking, plus de interactie met high-tech bedrijven in deze regio een enorme impuls zal geven aan verdere ont-

wikkeling en het naar de markt brengen van dit type zonnecellen.

### Literatuur

- <http://www.roth-rau.de>
- <http://www.fap-gmbh.de>
- Alfred Grill, "Cold Plasma Materials Fabrication: From Fundamentals To Applications" IEEE Computer Society Press (March 1994)
- Michael Lieberman and Allan Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", Wiley & Sons, 1994
- E. Rauchle, "Duo plasma line: a surface wave sustained linear extended discharge". J. Phys. IV France 8 (1998) Pr7-98.
- M. Kaiser et al., "Linearly extended plasma source for large-scale applications", Surface and Coatings Technology 116-119 (1999) 552.
- W. Soppe, B.B. Van Aken, C. Devilee, and H. Schlemm, "A novel linear RF source for PECVD of thin film silicon", presented at the 22th EUPVSEC, Milan 2007.
- B. Van Aken et al., "In situ measurements of surface (photo)voltage of roll-to-roll deposited thin film silicon solar cells", Phys. Status Solidi A 207, No. 3, 682-685 (2010)
- Ruud Schropp and Miro Zeman, "Amorphous and microcrystalline silicon solar cells", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- T. Zimmermann et al., "Inline dynamic deposition of a-Si and uc-Si:H thin film solar cells" presented at the 25th EUPVSEC, Valencia, 2010.
- M. Heijna et al., "Roll to roll nanotexturization of layers on steel foil substrates for nip silicon solar cells.", presented at the 25th EUPVSEC, Valencia 2010.
- A.V. Shah, et al., "Thin-film Silicon Solar Cell Technology", Progress in Photovoltaics, 12 (2004) 113-142
- <http://www.silicon-light.eu/>
- <http://www.solliance.eu/>