

Entwicklung und Fertigung von CIS-Solarmodulen bei Siemens Solar

Einleitung

Siemens Solar entwickelt seit mehreren Jahren in seinen deutschen und amerikanischen Laboratorien eine material- und kostensparende Dünnschicht-Technologie. Seit 1994 konzentrierte sich das Unternehmen auf die sogenannte CIS-Solarzelle (CIS: Copper Indium Diselenid), da dieser Zellentyp einen sehr hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig niedrigen Herstellungskosten verspricht. Wie bei anderen Dünnschichttechnologien beruhen die erwarteten Kostensenkungen aus dem geringeren Material- und Energieverbrauch zur Herstellung, der Verarbeitung großer Flächen sowie der integrierten Serienschaltung. Für die CIS-Technologie spricht weiterhin die gute Langzeitstabilität, die anhand von Messungen über inzwischen mehr als 10 Jahre am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Colorado belegt werden kann.

Erste kommerzielle Produkte auf CIS-Basis mit 5 und 10 W Nennleistung wurden 1997 am Markt eingeführt, inzwischen wurde die Palette auf 20 und 40 W Module erweitert [1]. Das besondere Augenmerk beim Fertigungsanlauf dieser Solarmodule gilt einer möglichst vollständigen Fertigungskontrolle, um hohe Reproduzierbarkeit und Ausbeute zu gewährleisten. Nur so sind die potentiell günstigeren Herstellungskosten der CIS-Dünnschichttechnologie verglichen mit der bisherigen Siliziumtechnik auch in die Praxis umzusetzen.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Feldtest der CIS-Produkte in unterschiedlichen klimatischen Zonen sowie beschleunigten Stress-tests unter verschärften Bedingungen in der Klimakammer. Beides dient der Absicherung einer guten Langzeitstabilität der neuen Produkte, vergleichbar den erprobten Solarmodulen aus kristallinem Silizium.

Die ST Serie von Siemens Solar: Erste kommerzielle CIS-Solarmodule

Die derzeit von Siemens Solar gefertigten CIS-Produkte bestehen aus einem Zellenverbund mit einer Molybdän-Rückelektrode, einer polykristallinen Cu(In,Ga)(S,Se)₂ Absorberschicht und einer Fensterschichtkombination aus CdS und ZnO. Das Floatglassubstrat mit der aktiven Schicht wird mit einem getemperten Sicherheitsglas auf der Vorderseite abgedeckt und versiegelt. Die Substratrückseite sowie der Glasrand wird von einer Kunststoff / Aluminium-Verbundfolie umschlossen und von einem Aluminium-Rahmen zusätzlich geschützt. Die Nennleistung der Module ST 5 bis ST 40 liegt bei 5 bis 40 W unter Standardtestbedingungen (100 mW/cm², AM 1.5 Spektrum, 25°C).

Abb. 1 zeigt die gesamte derzeitige Produktpalette einschließlich der wichtigsten Leistungsdaten.

Dr. F. H. Karg
Siemens Solar GmbH
Otto-Hahn-Ring 6,
D-81739 München

Abbildung 1
Die ST Serie von Siemens Solar basiert auf CIS-Dünnschicht-solarzellen. Die Module mit Nennleistungen zwischen 5 bis 40 W sind für 12 V Anwendungen ausgelegt und bestehen aus 42 integriert verschalteten Einzelzellen.



Spezifikationen

Leistung:	5-40 W (ST 5-40)
Apert. Wirkungsgrad (bei STC):	8.3 - 9.9% (ST 5-40)
Apert. Fläche:	600 cm ² - 4000 cm ² (ST 5-40)
dP/dT:	0,5% /°C

←

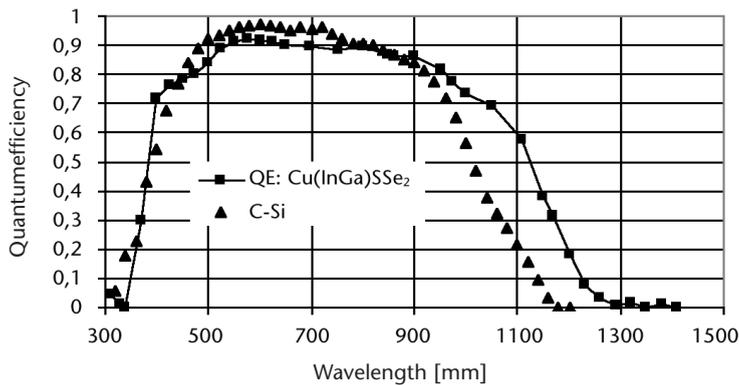


Abbildung 2 ↑
Spektrale Empfindlichkeit von kristallinem Silizium und CIS Solarzellen im Vergleich.

Der Temperaturkoeffizient der Leistung als auch die spektrale Empfindlichkeit (Abb. 2) unterscheiden sich nur unwesentlich von kristallinem Silizium.

Feldtest von CIS-Solarmodulen

Abbildung 3 ↓
Beispiele für CIS-Testanlagen in verschiedenen Klimazonen trocken-heiß (New Mexico, links), feucht-warm (Florida, Mitte), feucht – kühl (Berlin, rechts)

Erfahrungen mit der Langzeitstabilität von CIS-Modulen erstrecken sich in der Zwischenzeit über mehr als 10 Jahre. Seit 1988 befinden sich CIS-Demonstratormodule aus der Entwicklung von Siemens Solar am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Golden (Colorado) im Feldtest. [1]



Bei intakter Versiegelung zeigten selbst die ältesten CIS-Module über 10 Jahre stabiles Verhalten. Auch die parallel erfolgten Tests von CIS-Modulen unter verschärften Bedingungen in Klimakammern nach den Vorschriften der IEC 1646 belegten, daß die Langzeitstabilität dieser neuen Dünnschichtmodule bei guter Feuchteversiegelung gewährleistet ist [2]. Um die Jahresenergieausbeute und das Langzeitverhalten der ST-Module in verschiedenen

Klimazonen genauer auszuwerten wurden insgesamt 10 Testanlagen von je ca. 1.2 kW Nennleistung (zusammengesetzt aus 32 ST-40 Modulen) aufgebaut. Abb. 3 zeigt drei aktuelle Beispiele für diese CIS-Testanlagen in New Mexico, Florida und Berlin.

Herstellungsverfahren

Die Herstellung der nur wenige Mikrometer dicken aktiven Schicht eines CIS-Solarmoduls erfolgt auf großflächigen Glassubstraten in einer Sequenz von Beschichtungs- und Strukturierungsschritten. Der Halbleiterabsorber Cu(Ga,In)(S,Se)₂ wird bei Siemens Solar in einem zweistufigen Verfahren hergestellt. Die Beschichtung der Metallkomponenten des Halbleiters erfolgt bei Raumtemperatur im Sputterverfahren. Dazu werden vorteilhafterweise industriell erprobte Standardanlagen analog zur Fertigung von Architekturgläsern eingesetzt. Die nachfolgende Temperung der beschichteten Glasscheiben bei etwa 500°C erfordert keine Beschichtungseinrichtungen im Temperofen mehr und vereinfacht sich dadurch erheblich. Zusätzlich garantiert diese Trennung von Beschichtung und Temperung die nötige Prozeßreinheit, da die Ofenauskleidung in diesem

Fall komplett aus korrosionsresistenten Glas- und Keramikmaterialien erfolgen kann. Die komplette Prozessierung der CIS-Module erfolgt auf einem Format von 30 cm x 120 cm. Dies ermöglicht die Herstellung von 40 W Modulen in einem Arbeitsgang anstelle der bisherigen Prozessierung einzelner Silizium-Wafer und der anschließenden Serienschaltung. Die Strukturierung und Serienschaltung ist wie bei anderen Dünnschichttechnolo-

gien auch hier in den Fertigungsablauf integriert und erfolgt mittels Laser und mechanischer Strukturierungsverfahren. Damit wird der Arbeitsaufwand reduziert und alle Lager- und Transporteinrichtungen vereinfacht. Die evtl. erforderliche Unterteilung in kleinere Leistungseinheiten von 5 W, 10 W und 20 W wird erst am Ende der Herstellung vorgenommen (Abb. 6 oben).

Die Wirkungsgrade in der aktuellen Fertigungslinie liegen im Mittel bei über 11% und damit an der Spitze aller Dünnschichttechnologien. Die gute Verteilung ist das Ergebnis einer sorgfältigen Kontrolle aller Prozessschritte und insbesondere einer Reduktion der Verunreinigungen aus dem Glassubstrat (Abb. 4).

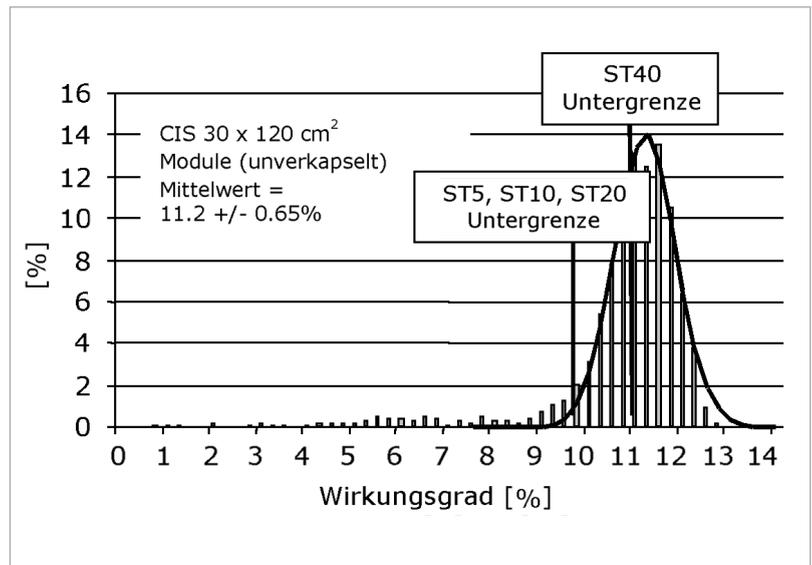


Abbildung 4 Aktuelle Wirkungsgradverteilung aller CIS-Module aus der Fertigung vor der Verkapselung (Modulfäche: 4000 cm²)

Fertigungsverfahren für die zweite CIS-Generation

Neue Fertigungsverfahren befinden sich derzeit in unserer Entwicklung die die bisherigen Stapelverarbeitungsprozesse durch Fließprozesse ersetzen sollen. Damit erwarten wir reduzierte Mengen an zwischengelagerten, teilprozessierten Produkten und zusätzlich eine weiter erhöhte Reproduzierbarkeit und Ausbeute. In-Line Temperprozesse erfordern die sichere Beherrschung schneller CIS-Schichtbildungsprozesse sowie der ebenfalls beschleunigten Aufheiz- und Abkühlprozesse für große beschichtete Glasplatten. Die Voraussetzungen dafür wurden in der Vergangenheit mittels der sogenannten RTP-Selenisierung (rapid temperature process) erarbeitet [4].

Dabei wird ein Schichtpaket bestehend aus Kupfer, Indium und Gallium sowie einer abschließenden Bedeckung aus elementarem Selen mit relativ hohen Aufheizraten von bis zu 5°C /s auf höhere Temperaturen gebracht, bei der die zuvor aufgetragenen Einzelkomponenten zur Halbleiterverbindung reagieren. Kleinmodule mit 20 cm² aktiver Fläche und 12 serienschalteten Einzelzellen, die mit dieser Technik hergestellt werden, zeigen in der Zwischenzeit reproduzierbar hohe Wirkungsgrade von über 13% (Abb.6). Die gegenüber Ofenprozessen wesentlich kürzeren Reaktionszeiten erlauben nun eine Übertragung auf Durchlaufprozesse. Derzeit erfolgt die Hochskalierung des RTP Prozesses von 10 x 10 cm² auf 60 x 90 cm², für künftige Massenfertigungen soll nochmals eine Flächenvergrößerung realisiert

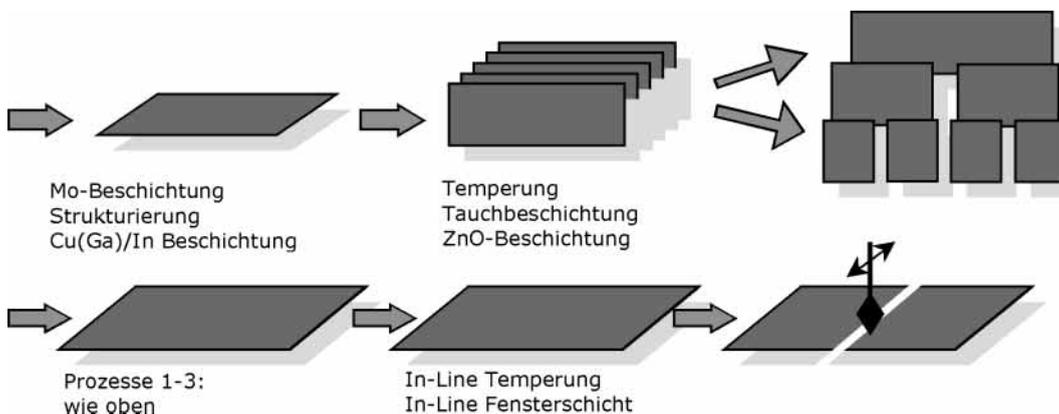


Abbildung 5 Übergang von Batch- (oben) zu In-Line Prozessen (unten) bei künftigen CIS-Fertigungslinien, die derzeit bei Siemens Solar in München entwickelt werden.

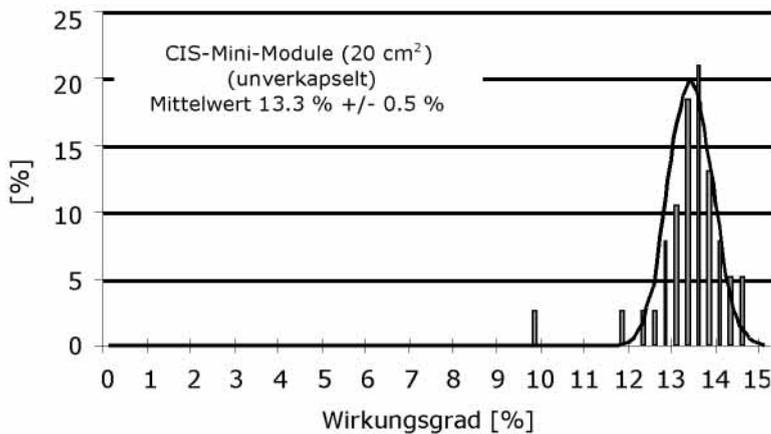


Abbildung 6
Wirkungsgradverteilung eines verbesserten Prozesses in der Entwicklung (Modulfläche 20 cm²)

werden. Die erforderliche Temperaturhomogenität auf großer Fläche auch während schneller Aufheizprozesse wurde mit einem neuentwickelten Prototypen bereits gezeigt. Siemens Solar erzielte 1999 sowohl für große Leistungsmodule aus der regulären Fertigung in Camarillo als auch für kleine Modulprototypen aus der Entwicklungslinie in München internationale Bestwerte. Die Maximalwertevon bis zu 12.1% auf einer Fläche von 0.4 m² sowie bis zu 14.7% an Minimodulen im Entwicklungslabor zeigen das Potential dieser Technologie auf und lassen Wirkungsgrade über 12% bei künftigen CIS-Produkten in nicht allzuferner Zukunft erwarten [5].

Ausblick

Erste CIS-Solarmodule befinden sich seit drei Jahren am Markt und finden erste wichtige Anwendungen: Aufgrund ihrer integrierten Serienschaltung lassen sich CIS-Module im unteren Leistungsbereich (bis ca. 10 W) potentiell kostengünstiger als die bisherigen, aus 36 Silizium-Wafern zusammengesetzten Module herstellen. Auch für größere Leistungsmodule erwarten wir deutliche Kostensenkungen, sobald die Fertigung ein größeres Volumen erreicht hat. Volumenbegrenzungen durch den Einsatz relativ seltener Elemente wie Indium oder Umweltbeeinträchtigungen durch den Einsatz selenhaltiger Materialien sind nach den vorliegenden Untersuchungen nicht zu erwarten (siehe auch untenstehenden Kasten.) Die CIS-Leistungsmodule finden aufgrund ihrer homogenen optischen Erscheinung Interesse

bei architektonisch anspruchsvollen Anwendungen und sind darüberhinaus aufgrund der langgestreckten Form ihrer Einzelzellen weniger anfällig gegenüber Teilverschattung. Erste spezielle CIS-Module zur Fassadenintegration befinden sich in der Entwicklung zusammen mit Partnern aus der Glasindustrie.

Weitere Verbesserungen des Wirkungsgrades und Senkungen der Herstellkosten erfordern eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Dies betrifft beispielsweise kadmiumfreie Fensterschichten oder die Minimierung der zur CIS-Kristallbildung optimalen Temperaturrezeptur. Neue Entwicklungspartnerschaften von Siemens mit Universitäten in Erlangen, Oldenburg, Würzburg sowie dem Hahn-Meitner-Institut bieten gute Voraussetzungen, die Leistungsreserven der CIS-Solarzelle weiter auszuloten.

Zusammenfassung

CIS-Solarmodule in Dünnschichttechnologie wurden erstmalig 1997 von Siemens Solar am Markt eingeführt. In Bezug auf Leistung, Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit weisen diese Module deutliche Vorteile gegenüber bisherigen Dünnschichttechnologien auf. Mittlere Wirkungsgrade von über 11% auf 0.4 m² Fläche werden in der derzeitigen Fertigung erzielt, in der Entwicklung wurden bereits neuartige Prozesse mit mittleren Wirkungsgraden von über 13% auf kleinen Prototypmodulen demonstriert. Zur Erzielung niedriger Fertigungskosten werden die Einzelprozesse kontinuierlich verbessert mit dem Ziel, einen möglichst vollständigen In-Line Prozeß auf großen Substratflächen und hohe Ausbeuten zu realisieren.

Häufig gestellte Fragen zur CIS-Technologie:

Gibt es Grenzen bzgl. verfügbarer Indiumressourcen?



Materialverbrauch begrenzend für die CIS-Technologie?

Gegenüber dem Verbrauch von 0.5-1 kg/m² an Halbleitersilizium für herkömmliche Module fällt die benötigte Metallmenge für die CIS-Dünnschichttechnologie deutlich geringer aus. (Sie ist in etwa vergleichbar mit dem Silberverbrauch für die Kontaktfinger herkömmlicher Siliziumzellen.) Die benötigten Elemente Indium und Selen sind jedoch relativ selten und es ist zu prüfen, ob hieraus ein Kostenanstieg und eine Begrenzung der Fertigungskapazität zu erwarten wäre.

Je nach zugrundegelegter Materialausbeute und Recyclingquote werden pro Quadratmeter CIS-Modul 7-20g Molybdän, 1.5-4g Kupfer, 3-9g Indium, 7-20g Selen und 1-3g Zn benötigt. Die Herstellungswege der für ein CIS-Modul benötigten Rohstoffe, der dabei anfallende Energieverbrauch, sowie die Frage evtl. Ressourcenbegrenzungen wurden von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft im Rahmen des FORSOL-Programms näher beleuchtet.

Diesen Auswertungen zufolge ist die Förderung von Indium und Selen an die Zink bzw. Kupferverhüttung gekoppelt und könnte bei Bedarf gegenüber den heutigen Fördermengen verzehnfacht werden. Dies entspräche dann einer Jahresproduktion von 75 GW an CIS Solarmodulen. (Zum Vergleich: die derzeitige PV-Weltjahresproduktion liegt bei ca. 200 MW, der weltweite Zuwachs an Kraftwerkskapazität insgesamt beträgt 70 GW/a.) Diesen Ergebnissen zufolge kann die Fertigungskapazität für CIS-Module zwar nicht unbegrenzt, aber um mehr als den Faktor 100 gegenüber der heutigen Produktion an Silizium-Modulen gesteigert werden.

oder sind Gesundheitsprobleme beim großflächigen Einsatz selenhaltiger Verbindungen zu erwarten?



Umwelt und Gesundheitsgefahren durch CIS-Module?

Solarmodule enthalten eine Reihe von Elementen, denen eine potentielle toxikologische Wirkung zugeschrieben wird. Bei der CIS-Technologie sind Selen und Kadmium in einer Konzentration von 3-5g bzw. 0.2g pro Quadratmeter Modulfläche enthalten. Mögliche damit verbundene Umwelt- und Gesundheitsaspekte wurden experimentell im Rahmen eines 3-jährigen BMBF-Projekts unter Federführung der FhG ausführlich untersucht. Da die CdS-Pufferschicht in künftigen Serienprodukten wohl durch Zink- oder Indiumverbindungen ersetzt werden kann, konzentriert sich die Fragestellung hier auf den Selengehalt der CIS-Module.

Im Normalbetrieb der PV Anlage kann durch den hermetischen Einschluß zwischen den Glasplatten keine Komponente der Dünnschicht in die Umwelt gelangen. Bei gebrochenen Modulen könnte es jedoch zu Auswaschungen oder im Brandfall zur Freisetzung flüchtiger Bestandteile kommen. Anhand von Verbrennungsexperimenten und Freilandversuchen mit CIS-Modulen von Siemens Solar zeigte sich jedoch, daß das daraus resultierende Gefährdungspotential als sehr gering einzustufen ist. Die aus zerbrochenen Modulen über Auswaschungen verursachten Zusatzbeiträge an Selen und anderen Metallen waren deutlich geringer als die Grundkonzentration in Trinkwasser und Boden. Bei Erhitzen auf Temperaturen über 600°C kommt es unter oxidativen Bedingungen zwar zur Freisetzung von Selen aus der CIS-Schicht. Bedingt durch die geringe Gesamtmenge liegen aber auch hier die durch Inhalation oder über Nahrungsmittel aufgenommenen Zusatzbeiträge unterhalb der für (das essentielle Spurenelement) Selen von der WHO empfohlenen(!) Dosis.

Danksagung

Die Entwicklungsarbeiten der Siemens AG wurden gefördert durch das BMBF unter der Projektnummer 0329218, die Arbeiten der Siemens Solar GmbH wurden gefördert durch die Bayerische Forschungstiftung, das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen sowie der Europäischen Union.

Referenzen:

- [1] R.D. Wieting, Proc. 15th NCPV Photovoltaic Program Review Denver, pp 3-8, AIP Conf. Proc. 462, AIP (1999)
- [2] F. H. Karg, H. Calwer, J. Rimmasch, V. Probst, W. Riedl, W. Stetter, H. Vogt, M. Lampert
Proc. 11th Int. Conf. on Ternary and Multinary Compounds (Salford, 1997)
p. 909
- [3] V. Probst, W. Stetter, W. Riedl, H. Vogt, M. Wendl, H. Calwer, S. Zweigart, K.-D. Ufert, B. Freienstein, H. Cerva, F. H. Karg E-MRS Conference Strasbourg 2000, wird veröffentlicht.
- [4] F. H. Karg Proc. 11th Int. PVSEC, Sapporo, 1999, p. 267