

ISC Konstanz – Research for a sunny future!

Kurzbericht zu Verbundforschungsauftrag

Verfahrenstechnische Grundlagen von Hochleistungs-Hybridplasmaverfahren zur Erzeugung von siliziumbasierten solaraktiven Schichten und Schichtsystemen (PlasSol)

- durchgeführt im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung -

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt PlasSol hatte zum Ziel mittels Hochleistungsplasmaverfahren große Flächen mit hohen Abscheideraten schnell und kostengünstig mit Silizium zu beschichten und dadurch die Herstellungskosten von solaraktiven Siliziumschichten erheblich zu senken. Ausgehend von der Gleichstrom- wurde die Mikrowellenplasmatechnik bei einer Frequenz von 915MHz in einer resonanten Anordnung erstmals eingesetzt. Dadurch konnten freistehende Plasmen ohne direkten Elektrodenkontakt erzeugt werden. Für genügend hohe Plasmaenergiedichten wurden solaraktive Schichten aus Si-Pulver alternativ zu Silan als Ausgangsmaterial erzeugt. Si-Schichten bis 1µm Dicke und Flächen bis 20x20cm² mit Defektdichten < 10¹⁶/cm³ und optischer Aktivierungsenergie (Bandlücke) von ca. 1.7eV konnten so mit Abscheideraten bis über 10nm/s erzeugt werden und die Leistungsfähigkeit dieser Technologien zur Herstellung von solaraktiven Si-Schichten demonstriert werden.

Autor: Dr. Joachim Glatz-Reichenbach

Auftraggeber: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Projekt PlasSol E09

Projektdauer: 01.09.2007 – 31.12.2010

Im Internet zu finden unter: http://isc-konstanz.de/fileadmin/doc/PlasSol_Final.pdf

Versionsdatum: 30.05.2011

International Solar Energy Research Center Konstanz e.V., Konstanz 2011

Ziel des Vorhabens

Ein Schlüssel für die Anwendung von Dünnschicht-Technologien für Photovoltaikanwendungen ist die Verfügbarkeit von geeigneten Beschichtungstechnologien, die den Anforderungen hinsichtlich Funktion und Wirtschaftlichkeit genügen.

In dem durchgeführten Projekt PlasSol wurden Hochleistungsplasmaverfahren eingesetzt, die das Potenzial besitzen, große Flächen zu beschichten und die Kosten von Silizium (Si)- Schichten erheblich zu senken. Dabei erstreckt sich das Anwendungsgebiet des neuen Forschungsvorhabens von der Entwicklung und Diagnostik neuer Hybrid-Plasmaverfahren bis hin zu der Erzeugung von amorphen Si-Dünnschichtsystemen und Mischschichten aus amorphem und mikrokristallinem Silizium.

Es wurden Gleichstromplasmen, induktiv beheizte Plasmen und durch Mikrowellen erzeugte Plasmen untersucht. Zudem ermöglicht die Kombination dieser Plasmen in sog. Hybridanlagen eine Synergie der jeweiligen spezifischen Plasmaeigenschaften, wie z. B. hohe Elektronen-, Ionen- und Radikaldichten, die mit hohen Teilchenenergien kombiniert werden.

Dabei sind die wesentlichen Merkmale dieser neuen Technologie für die Erzeugung von Si-Dünnschichten:

1. Die hohe im Plasma umgesetzte Energie erlaubt ein Verdampfen von Si und die Erzeugung eines Plasmas mit hohen Teilchendichten. Dies ist vorteilhaft sowohl für die Schichteigenschaften als auch für die Schichtqualität.
2. Es können hohe Massenströme (bis zu 20 g/s) realisiert werden. Dies gewährleistet hohe Beschichtungsraten.
3. Der Druck kann zwischen 1 Pa und 200 kPa eingestellt werden. Damit können die Schichteigenschaften über einen großen Bereich variiert werden.
4. Es kann eine große Bandbreite von Ausgangsstoffen dem Plasmastrahl zugeführt werden, so dass z. B. ein gradiertes Schichtaufbau von Si zu SiC möglich ist.

Angaben zur Durchführung des Projekts

In der Anfangsphase des Projekts wurden zwei alternative Hochleistungsplasma Technologien, die bereits industriell vom Projekt-Partner Dr. Laure Plasma Technologie GmbH eingesetzte Gleichstromplasmatechnik und die neu zu entwickelnde Mikrowellenplasmatechnik evaluiert und für Testbeschichtungen von photovoltaisch aktivem intrinsischem und dotiertem Si angepasst bzw. weiterentwickelt. Erstere diente dazu prinzipiell Eignung und Grenzen von Plasma Beschichtungsverfahren aufzuzeigen, letztere die großflächige und kostengünstige Abscheidung für photovoltaisch einsetzbare dünne Si-Schichten zu optimieren und gegebenenfalls beide Techniken zu einer Hybrid-Plasmatechnologie zu vereinen.

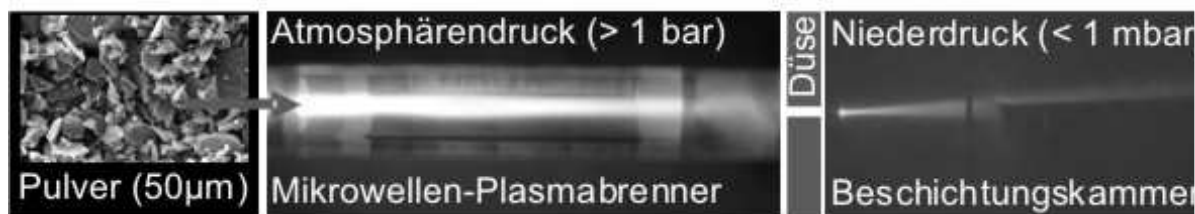


Abb. 1: Schematische Darstellung des silanfreien Prozesses des IPF der Uni Stuttgart.

Amorphes Silizium wird bereits für die Photovoltaik und Bildschirmtechnik aus Silan (SiH_4) entweder in einem PECVD-Prozess oder mittels des Hot-Wire-Verfahrens unter Zugabe von Wasserstoff umgesetzt und abgeschieden. Neben der kostenintensiven Synthese von Silan ist dieses relativ aufwändig zu handhaben.

Im Projekt PlasSol wurde ein Prozess entwickelt, der die Herstellung von Silan übergeht und direkt aus Siliziumpulver amorphes Silizium abscheidet (siehe Abb. 1). Hierzu wird das Pulver in einen Mikrowellenplasmabrenner, mit einer Frequenz von 915 MHz, eingeblasen und in ei-

nem Ar/H₂-Plasma zunächst aufgeschmolzen, verdampft und in die Plasmaphase überführt. Das Plasma verlässt den Plasmabrenner durch eine Düse und expandiert in die Beschichtungskammer. Durch die Düse wird eine Separation von Verdampfung bei Atmosphärendruck und Beschichtung im Niederdruck erreicht. Die erforderlichen mittleren freien Weglängen lassen sich über Gasfluss, Pumpleistung und Düsenöffnung an die zwei Prozesse anpassen.

Die mittels optischer Emissionsspektroskopie gemessene Gastemperatur von 7500 K ist etwa dreimal so hoch wie der Siedepunkt von Silizium. Die Kontaktzeit mit dem Plasma ist jedoch noch relativ kurz und begrenzt deshalb die maximal einsetzbare Größe der Siliziumpartikel, die vollständig verdampfen, auf einige 10 µm für derzeitige Plasmaleistungen von $P < 30\text{ kW}$.

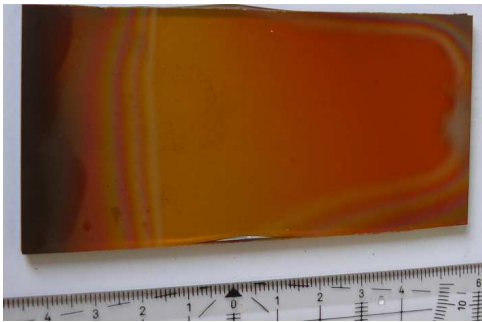


Abb. 2: Bruchstück eines 20cm x 20cm großen Glassubstrats, das eine ca. 350 nm dünne Schicht aus amorphem Silizium (aSi) trägt, die über einen DC-Hochleistungs Plasmaprozess bei einer elektrischen Eingangsleistung von $P = 45\text{ kW}$ direkt aus dem Ausgangsmaterial Si-Pulver abgeschieden wurde.

Es entwickelte sich eine intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen den beiden Forschungsinstituten, dem IPF der Uni Stuttgart (Mikrowellenplasmatechnologie), dem ISC Konstanz (optische und elektrische Charakterisierung der Siliziumschichten) und den fünf Industriepartnern Dr. Laure Plasma Technologie GmbH (Hochleistungs DC und induktiv geheizte Plasmen), Muegge Electronic GmbH (Entwicklung Mikrowellenplasmabrenner und diverser Mikrowellenkomponenten), Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG (ex. Paradigma) und Ritter Solar GmbH & Co. KG (Unterstützung und Beschaffung Vakuumsystem und Massenspektrometer) und EADS Deutschland GmbH (Plasmacharakterisierung, Bereitstellen, Modifizieren und Charakterisieren der Si-Pulver).

Erzielte Ergebnisse

- Glassubstrate mit Flächen von 100-400 cm² können gezielt mit aSi und µSi-Schichten der Dicke 50 bis 1300 nm +/- 5 % mit Aufwachsrate von 5-10 nm/s (5 kW Mikrowellenplasma) und über 100nm/s (45 kW DC-Plasma) beschichtet werden.
- Defektdichten von $8 - 10 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$ werden erreicht und liegen somit bei Werten für Photovoltaik Anwendungen von kleiner $8 \cdot 10^{16}/\text{cm}^3$.
- Die optische Bandkante liegt mit ca. 1.7 eV bei angestrebten Werten von 1.7 - 1.75 eV.
- Neun nationale und internationale Veröffentlichungen gehen aus dem Projekt hervor.

Mögliche Anwendungsfelder

Großflächige, kostengünstige Abscheidung von aSi und µSi-Schichten für die:

- Dünnschicht-Photovoltaik als Absorberschichten
- PV-HIT (= Heterojunction intrinsic thin layer) Technologie
- Anwendung als Passivierungsschichten

Ansprechpartner:

ISC Konstanz e. V., Rudolf-Diesel-Str.15, D-78467 Konstanz, www.isc-konstanz.de

Dr. Joachim Glatz-Reichenbach, Tel.: +49-7531-36183-51, Fax: +49-7531-36183-11
joachim.glatz-reichenbach@isc-konstanz.de