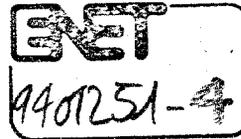


~~Bäumleingasse 22~~

~~4001 Basel~~

~~Tel. 061 23 30 00~~

Pfluggässlein 2/Freie Strasse 38 4001 BASEL Tel.: 061 / 262 04 44



Beilage 682 E

An den

Nationalen Energie-Forschungs-Fonds

Pfluggässlein 2/
Freie Strasse 38
Postfach 309
4001 BASEL

Schlussbericht

Gesuch-Nr. 682

Zwischenbericht

Bitte lesen!

Bericht und Abrechnung

1. Projekt-Träger:

Prof. A. Shah
Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel
Rue Breguet 2, CH-2000 Neuchâtel

Berichtersteller:

Michael Goetz, Herbert Keppner
Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel

Titel des Projektes:

Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen amorphen Silizium-Solarzellen

Datum der Gesuchsbewilligung
durch Stiftungsrat: 30.05.94

Beginn der Projektarbeiten: 01.01.94

Datum bereits erstatteter
Zwischenberichte: 13.12.94, 23.03.95, 20.09.95

Ende der Berichtsperiode: 31.12.95

Bewilligter Beitrag	Fr.	534'000.--
Hiervon bezogen	Fr.	350'000.--
Beanspruchte Restzahlung	Fr.	184'000.--
Definitiv nicht beanspruchte Restzahlung	Fr.	---.---

2. Inhaltsübersicht über den Bericht:

(In den Beiblättern des Berichterstatters zu übernehmende Dispositionen)

- 2.1. Schilderung der Projektbearbeitung
- 2.2. Unvorhergesehene Vorkommnisse und Entwicklungen
- 2.3. Erfolg der Projektarbeiten im Verhältnis zu den Erwartungen bei der Gesuchstellung
- 2.4. Berichterstattung über erfolgte und beabsichtigte Anmeldung bzw. Verwertung von Schutzrechten
- 2.5. Erfolgte oder beabsichtigte Publikationen
- 2.6. Allfällig gewünschte Mitwirkung des NEFF bei beabsichtigten Publikationen
- 2.7. Hinweise auf offene, vom NEFF künftig zu verfolgende Forschungsbereiche
- 2.8. Fakultativer Zusatzbericht
- 2.9. Verwendung des NEFF-Beitrages nach
 - Personalkosten
 - Materialkosten
 - Mietkosten
 - Reisekosten
 - Literatur
 - übrige Kosten
- 2.10. Aufstellung des aus NEFF-Mitteln finanzierten, nach Abschluss des Forschungsprojektes noch verwertbaren Materials (Anlagen, Maschinen, Geräte etc.)

Datum und Unterschrift

2.1. Schilderung der Projektbearbeitung

2.1.1 Verbesserungen an der n-i-p Solarzelle (Schichten und Interfaces)

Es war uns wichtig, die Probleme, die mit der Abscheidefolge der n-i-p Zellen zu tun haben, von den Substratproblemen unterscheiden zu können. Aus diesem Grunde haben wir, parallel zu den Zellen auf Aluminium, eine ganze Serie von n-i-p Zellen auf kommerzielle Glas / TCO-Substrate abgeschieden. Dabei wurden vor allem zwei Punkte untersucht:

a) Wachstum der <p>-Schicht auf der <i>-Schicht

Mikrokristallines Wachstum der dünnen <p>-Schicht auf der amorphen Unterlage ist nur durch die Wahl der Depositionsparameter *der Schicht* alleine kaum zu erreichen. Für diese ultradünnen Schichten spielen die Nukleationsbedingungen eine entscheidende Rolle.

Aus diesem Grund versuchten wir durch folgende Vorbehandlungen des Interfaces, die Nukleationsbedingungen zu verbessern:

- Vorbekeimung: z.B. durch Sauerstoff-, Wasser-, CO₂-Plasma: Begasen mit Luft oder Sauerstoff
- Umstrukturierung der Oberfläche: durch Ionenbombardement in einem Wasserstoffplasma.

b) Wachstum des transparenten Frontkontaktes auf der <p>-Schicht

Ein guter Kontakt zwischen der (sonnenseitigen) p-Schicht und ihrer transparenten Kontaktierung (Indium-Zinnoxid oder Zinkoxid sind n-leitend!) ist nicht selbstverständlich. Es konnte gezeigt werden, dass das Problem mit dem vorhergenannten gekoppelt ist: je besser die Mikrokristallinität der <p>-Schicht ist, desto besser ist der Kontakt zwischen diesen Schichten.

2.1.2 Ergebnisse Solarzellen

Es konnten auf Glas/TCO Substraten erstmals am IMT n-i-p Solarzellen mit über 9% Anfangswirkungsgrad hergestellt werden. Auf Metallsubstraten wurden Wirkungsgrade um 8% erreicht. Die Strom/Spannungs-Kennlinien und die Spektralantwortkurven zweier Zellen sind in Figuren 1 und 2 dargestellt. Der maximale Füllfaktor lag bei 66%, was einer entscheidenden Verbesserung gegenüber dem 1. Projektjahr (1994) entspricht, wo Werte von 57% mit einer n-i-p Struktur nicht überschritten werden konnten. Dennoch liegt dieser Füllfaktor noch weit unter dem Wert von 75%, der bei konventionellen p-i-n Zellen in unserem Labor erreicht wird. Offenbar liegt hierin noch ein grosses Verbesserungspotential.

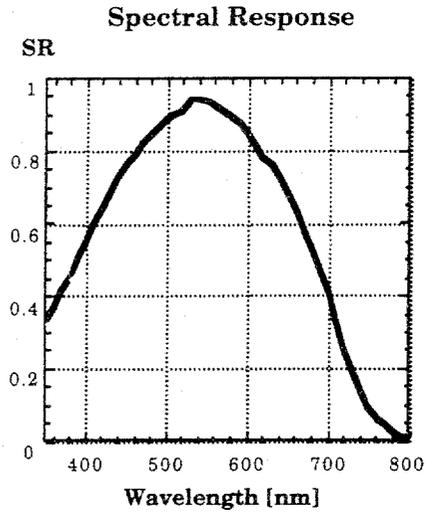
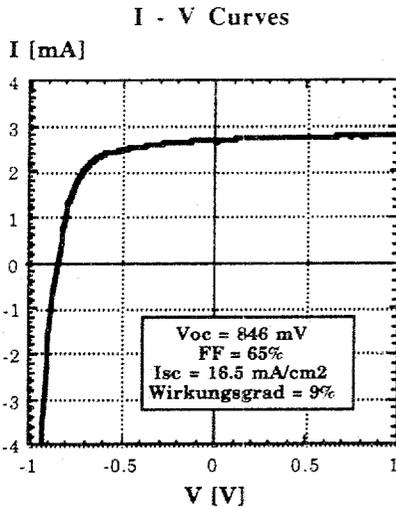
- Beste n-i-p Zelle auf Glas / TCO (TCO: Asahi U, texturiert)

$V_{OC} = 885 \text{ mV}$

$FF = 66\%$

$\eta = 9.0\%$

$I_{SC} = 15.45 \text{ mA/cm}^2$



Figur 1: Strom-Spannungs-Kennlinie und Spektralantwort einer n-i-p Solarzelle auf Glas/TCO mit 9% Wirkungsgrad und einem Füllfaktor von 65%. (Fläche 0.2 cm^2)

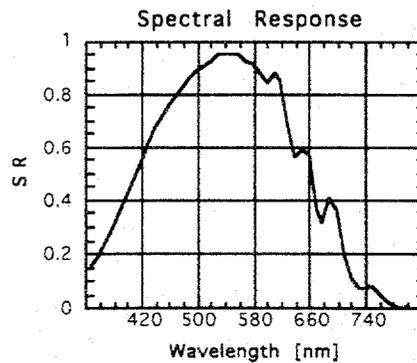
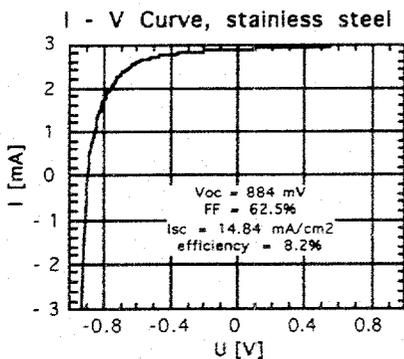
- Beste nip-Zelle auf rostfreiem Stahl mit flachem Zinkoxid als Rückkontakt:

$V_{OC} = 884 \text{ mV}$

$FF = 62.5\%$

$\eta = 8.2\%$

$I_{SC} = 14.84 \text{ mA/cm}^2$



Figur 2: Strom-Spannungs-Kennlinie und Spektralantwort einer n-i-p Solarzelle auf rostfreiem Stahl mit 8.2% Wirkungsgrad und einem Füllfaktor von 62.5%. (Fläche 0.2 cm^2)

- Beste nip-Zelle auf Aluminium mit *texturiertem* Zinkoxid als Rückkontakt:

$$V_{OC} = 838 \text{ mV}$$

$$FF = 58.8\%$$

$$\eta = 8.0\%$$

$$I_{SC} = 16.2 \text{ mA/cm}^2$$

- Beste nip-Solarzelle auf Aluminium mit *flachem* Zinkoxid als Rückkontakt:

$$V_{OC} = 868 \text{ mV}$$

$$FF = 63\%$$

$$\eta = 7.85\%$$

$$I_{SC} = 14.3 \text{ mA/cm}^2$$

2.1.3 Untersuchungen zur Interdiffusion

Ausgangslage

Es ist aus der Microchipherstellung bekannt, dass Aluminium und Silizium bei direktem Kontakt miteinander reagieren; verschiedene Phänomene treten dabei schon bei Temperaturen unter 200°C auf. Deshalb wurden diverse Materialien als Diffusionsbarrieren vorgeschlagen, vor allem Oxide und Nitride von Metallen und Silizium.

Es ist jedoch wichtig, hier darauf hinzuweisen, dass die Diffusion in **dünnen** Filmen und bei diesen tiefen Temperaturen nicht durch die 'bulk'-Eigenschaften eines Materials sondern von Effekten an Korngrenzen und Defektstellen dominiert wird. In unserem Fall bedeutet das, dass die Auswahl eines bestimmten Antidiffusionsmaterials alleine noch sehr wenig aussagt; **das Material zusammen mit der Herstellungsmethode und der Schichtqualität entscheiden über Erfolg oder Misserfolg der Barriere.**

Um diese Probleme für unser konkretes System besser zu untersuchen, wurden zwei Messserien durchgeführt. In der ersten Serie wurden ganze Solarzellen auf Substrate deponiert, die mit verschiedenen Diffusionsbarrieren geschützt waren. An diesen Zellen wurde die Ausfallhäufigkeit bestimmt und es wurden SIMS-Messungen durchgeführt.

In einer zweiten Serie wurden nur sehr dünne *<i>*-Schichten auf verschiedene Substrate abgeschieden. Von diesen Proben wurden am Rasterelektronenmikroskop Bilder aufgenommen und es wurde mit verschiedenen Methoden die 'pinhole'-Dichte bestimmt. Dabei soll hier der Begriff 'pinhole' verallgemeinernd für alle leitenden Stellen in der isolierenden *<i>*-Schicht benützt werden: das eigentliche 'pinhole' ist nur **einer** der möglichen Formen eines solchen Defekts.

Aus diesen Untersuchungen zur Interdiffusion konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

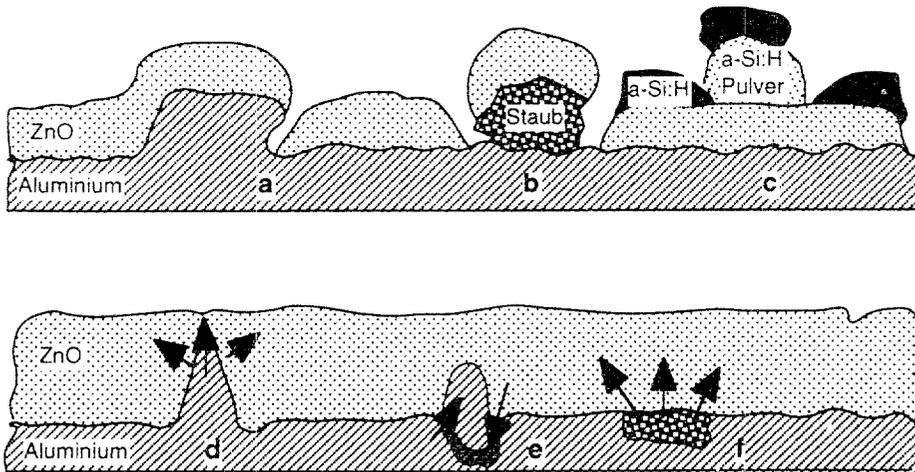
i) Die isotrope Diffusion wird durch die untersuchten Materialien (bei 'idealem' Wachstum¹) auf ein Mass reduziert, das der Zelle kaum schadet.

Der Vergleich der Spektralantwort einer Solarzelle bei 0 Volt und bei -1 Volt ist ein gutes Mass für die Verunreinigung der *<i>*-Schicht durch Fremdatome. Mit dieser Methode und mit SIMS-Messungen konnte gezeigt werden, dass die isotrope Diffusion der Atome aus dem Substrat die Zelle kaum beeinflusst.

ii) Im realen System ist jede Barriere nur so gut wie ihre lokalen Problemzonen ('Punkte').

In der ersten untersuchten Serie wurden für gute Diffusionsbarrieren 80% bis 90% Ausbeute (yield) erreicht. Dies entspricht ca. einer Problemzone pro cm². Figur 3 zeigt, wie wir uns solche Problemzonen vorstellen.

¹ Wachstum ohne 'pinholes' oder andere Fehlerstellen



Figur 3. Wie könnte man sich 'Punktprobleme' vorstellen, die zu einem Kurzschluss und zum Ausfall der Solarzelle führen? Obere Linie: pinholes durch a) Unebenheiten des Substrates b) Staub c) Siliziumpulver. Untere Linie: Anisotrope Diffusion durch d) lokale Spitzen e) 'spiking' f) Fremdatominseln.

Es zeigte sich in diesen Untersuchungen, dass die Zinkoxidschicht das Substrat nicht perfekt bedeckte. Unter anderem hatten Partikel, die sich vom ZnO-Target gelöst hatten, 'pinholes' verursacht. Dieses Problem konnte durch eine technische Änderung behoben werden.

2.1.4 Resultate Diffusionsbarriere

Die Aufgabe für den 2. Meilenstein im Herbst 1995 bestand darin, mit einer geeigneten Diffusionsbarriere auf Aluminiumsubstraten eine vergleichbare Ausfallhäufigkeit (gleicher yield) zu erreichen wie auf käuflichen Glas / TCO-Substraten. Tatsächlich hat das Experiment die Wirksamkeit der Diffusionsbarriere auf Substraten aus Aluminium bestätigt; auf beiden Substrattypen waren mindestens 96% der Zellen² funktionsfähig (Ausschliesslich flache Hochglanzsubstrate, einmal bei 180°C getempert).

2.1.5 Schlussfolgerungen

- Viele technische Verbesserungen von der Reinigung der Substrate bis zum Kontaktieren der Messspitzen mit minimalem Druck, wurden eingeführt.
 - Durch Verfeinern der Depositionsschritte wurde ein Wirkungsgrad von 9% auf käuflichen Glas / TCO-Substraten erreicht. Insbesondere konnte der im ersten Meilenstein auf 57% liegende Füllfaktor auf 65% erhöht werden. Auf Aluminiumsubstraten (mit texturiertem Rückkontakt) liegt der höchste bisher erreichte Wirkungsgrad bei 8%.
 - SIMS-Messungen bestätigen den Erfolg der Diffusionsbarrieren auf der Basis von Zinkoxid und Siliziumnitrid. Überall dort, wo die Schichten ohne Fehlerstellen aufgewachsen sind, ist die Metallkonzentration in der Zelle auf ein Niveau reduziert worden, das der Zelle kaum schädlich ist.
- Mit anderen Worten: das Problem der 'isotropen' Diffusion ist weitgehend gelöst.
- Nicht der 'bulk' einer Dünnschicht-Diffusionsbarriere entscheidet über ihren Erfolg, sondern ihre Fehlerstellen. In vielen Depositionen treten stochastisch verteilte Punktprobleme auf, die zum Ausfall der Zellen führen. Wir konnten einige mögliche Erklärungen zur Natur der Problemzonen ausschliessen; abgesehen von einem technischen Mangel, der im nächsten Punkt beschrieben wird, konnten wir jedoch keine Ursache der Problemzonen bestätigen.

² Ausser im Bereich zu dünner Diffusionsbarriere (Rand).

- Einer der Gründe für den Ausfall von Zellen waren Löcher in der Zinkoxidschicht, die durch vom Target herabgefallenen Partikel verursacht wurden. Ein Umbau der Sputteranlage führte zu Solarzellen mit sehr wenig Ausschuss (vergleichbar zu den Resultaten mit Glas / TCO-Substraten).
- Siliziumnitrid, mit PECVD bei 70MHz hergestellt, wurde als erfolgreiche Diffusionsbarriere und als alternative Isolatorschicht vorgestellt. Solarzellen mit 7% Wirkungsgrad wurden auf Alu / SiN / ZnO realisiert.

2.1.6 Perspektiven für 1996

Das Ziel ist es, am Schluss der letzten Projektphase die Frage abschliessend beurteilen zu können, ob Solarzellen aus amorphem Silizium mit vernünftigem Aufwand zuverlässig auf Aluminiumbleche abgeschieden werden können.

Aufgrund der Resultate der zweiten Projektphase kann man schliessen, dass der Füllfaktor das grösste Steigerungspotential für den Zellwirkungsgrad beinhaltet. Der Füllfaktor ist zudem ein ausgezeichnetes Kriterium für die Qualität der Zellen. Im Gegensatz z.B. zum Kurzschlussstrom I_{sc} hängt er nicht von "äusseren" Faktoren (light-trapping) ab, sondern widerspiegelt vielmehr die eigentliche "innere Qualität" der Solarzelle. Insbesondere stellt sich im Zusammenhang mit Substraten aus Aluminium auch die Frage, in welchem Masse lokalisierte Fehlerstellen- ähnlich denen, die zum totalen Zellausfall führen- nur eine Reduktion des Füllfaktors bewirken können.

Für 1996 sind nun folgende Teilschritte vorgesehen:

1. Es soll Edelstahl als metallisches Referenzsubstrat verwendet werden; damit soll abgeklärt werden, ob die bisher aufgetretenen Probleme ausschliesslich beim Einsatz von Aluminium-Substraten anzutreffen sind, oder allgemein für verschiedene Metalle zutreffen. Diese Arbeiten wurden bereits im Herbst 1995 begonnen.
2. Die Optimierung der Diffusionsbarrieren soll weiter vorangetrieben werden; damit streben wir gleichzeitig eine weitere Verbesserung der 'Sicherheit' (im Sinne von wenig Ausfällen bei erschwerten Testbedingungen) und eine Erhöhung des Füllfaktors an.
3. Untersuchung des Wachstumsverhaltens von Zellen auf Substraten, die keine völlig plane Oberfläche aufweisen (es gibt kein Metallsubstrat, das eine ebenso flache Oberfläche besitzt, wie ein Glassubstrat); der Einfluss dieser Unebenheiten soll anhand des Wachstums der Zellen über definierte Kanten beobachtet werden.
4. Weiterentwicklung der Solarzelle: Neben den in Punkt 2 und 3 erwähnten Massnahmen zur Erhöhung des Füllfaktors sollen die Depositionsparameter der Zelle und der sonnenseitige Kontakt weiter optimiert werden.

2.2 Unvorhergesehene Vorkommnisse und Entwicklungen

Die ersten beiden Projektjahre haben gezeigt, dass die Probleme im Zusammenhang mit Aluminium als Substratmaterial weit grösser sind als vorerst angenommen wurde. Deshalb wurde die Untersuchung des Diffusionsverhaltens und des Einflusses von Fehlerstellen an der Oberfläche des Substrates zu einem zentralen Punkt des Projektes.

Insbesondere wurden für das dritte Projektjahr (1996) von den Projektpartnern IMT und Aluisse-Lonza Services (A-L S) gemeinsam die Ziele neu definiert³. So soll am Schluss der letzten Projektphase die Frage abschliessend beurteilt werden können, ob Solarzellen aus amorphem Silizium mit vernünftigem Aufwand zuverlässig auf Aluminiumbleche abgeschieden werden können. Deshalb sollen einige Ziele des ursprünglichen Programmes aus dem Projektantrag zurückgestellt werden, um dem eingehenden und abschliessenden Studium der grundsätzlichen Probleme von Aluminium als Substratmaterial den Vorrang zu geben. Insbesondere soll auf die weitergehende Optimierung von light-trapping Strukturen und auf die Serienverschaltung von Zellen zu Modulen verzichtet werden.

³ Die teilweise Änderung der Projektziele wurde zusammen mit unserem Projektpartner A-L S in zwei Sitzungen (22.8.95 und 20.9.95) ausgearbeitet.

2.3 Erfolg der Projektarbeiten im Verhältnis zu den Erwartungen bei der Gesuchstellung

Wie im Kapitel 2.2 berichtet wird, mussten die Schwerpunkte des Projektes anders gelegt werden als ursprünglich vorgesehen war. Die beiden gesetzten Meilensteine 1994 und 1995 konnten indessen erreicht werden.

2.4 Berichterstattung über erfolgte und beabsichtigte Anmeldung bzw. Verwertung von Schutzrechten

Eine Patentanmeldung für die Abscheidung von pinhole-freien Solarzellen aus amorphem Silizium auf Aluminium ist für 1996 vorgesehen. Zur Zeit findet eine Abklärung zwischen A-L S und IMT statt.

2.5 Erfolgte oder beabsichtigte Publikation

Am Schweizerischen Photovoltaik-Seminar in Freiburg am 4./5. April 1995 wurde ein Poster mit dem Titel 'Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen Amorphen Silizium-Solarzellen' vorgestellt. Es behandelt den Einfluss der Farbwahl eines Solarmoduls auf seinen Wirkungsgrad. Die dazugehörige Publikation ist auf Seiten 221-224 des Tagungsbandes abgedruckt.

Für das '1996 MRS spring meeting' in San Francisco im April wird eine Publikation unter dem Titel 'Contamination Problems of Amorphous Silicon N-I-P Solar Cells on Metal Substrates' erarbeitet und als Poster vorgestellt.