

# Photovoltaische Solarzellen aus Ferrosilizium Höherer Reinheit<sup>\*)</sup>

V. Schlosser

L.Boltzmann Institut für Festkörperphysik, Wien

## 1) Einleitung

Ferrosilizium ist wie folgt definiert: Wird Silizium unter Vermeidung der energieaufwendigen Reinigung mittels Zersetzung in HCl-Gas, gefolgt von einer fraktionierten Destillation und der Abscheidung von polykristallinem Silizium aus gereinigtem Trichlorsilan, hergestellt, so spricht man von Ferrosilizium, ungeachtet der tatsächlichen Reinheit des Produkts. Da es unmöglich ist, Ferrosilizium, wie es bei der Reduktion von SiO<sub>2</sub> entsteht, für Solarzellen zu verwenden (Reinheit 98 % - 99 %), muß dieses weiter gereinigt werden. Derzeit übliche Methoden nutzen die unterschiedliche Löslichkeit der Fremdatome in flüssigem und festem Silizium. Die Reinigung kann dadurch mit der Kristallherstellung aus der Schmelze kombiniert werden. Im folgenden wird Ferrosilizium höherer Reinheit mit "UMG-Si" bezeichnet (engl.: Upgraded Metallurgical Grade Silicon).

## 2) Materialcharakterisierung und Grenzen der Anwendbarkeit von UMG-Si für Solarzellen

Betrachtet man den erforderlichen Energieaufwand der notwendig ist um ein fertiges Solarzellen Panel herzustellen, so zeigt sich, daß durch die Verwendung von UMG-Si anstelle von reinem Silizium bis zu 50 % des Energieaufwands eingespart werden kann. Das Verhalten von Solarzellen aus UMG-Si kann durch (i) die Minoritätsladungsträger Diffusionslänge  $L$ , (ii) die Konzentration von zum Teil kompensierenden Störstellen in der Raumladungszone des  $p$ - $n$ -Übergangs und durch (iii) die Anzahl und Größe von Mikroeinschlüssen von Siliziden (Partizipanten) in der Raumladungszone beschrieben werden.

$$j_L - j_{rg} - j_{diff} - j_{shunt} = j_{ext} \quad (1)$$

- $j_L$  ... Photostromdichte
- $j_{rg}$  ... Rekombinationsstromdichte
- $j_{diff}$  ... Diffusionsstromdichte
- $j_{shunt}$  ... Shuntstromdichte
- $j_{ext}$  ... Externe Stromdichte

$j_L$  ist der durch den Lichteinfall generierte Photostrom in der Solarzelle. Er ist zu der Anzahl der innerhalb  $1 \times L$  von der Oberfläche absorbierten Photonen proportional.  $L$  wurde für verschiedene Substratqualitäten bestimmt und liegt zwischen  $5 \mu\text{m}$  und  $50 \mu\text{m}$ .  $j_{rg}$  ist die Rekombinationsstromdichte über dem  $p$ - $n$ -Übergang, der durch die Konzentration und den Wirkungsquerschnitt von tiefen Störstellen innerhalb der Verarmungszone bestimmt wird. Solarzellen aus mg-Si zeigen Stromdichten für  $j_{rg}$ , die bis  $1000 \times$  größer sind als bei Solarzellen aus Reinstsilizium ( $j_{rg} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ Acm}^{-2}$  für Reinstsilizium). Partizipanten in Form von gutleitenden Siliziden, die innerhalb der Raumladungszone liegen, können den  $p$ - $n$ -Übergang mehr oder weniger kurzschließen ( $j_{shunt}$ ). Da die Diffusionsstromdichte für Silizium bei Raumtemperatur erst ab Spannungen von  $0.4 \text{ V}$  einen nicht vernachlässigbaren Anteil zur gesamten Stromdichte beiträgt, ist ihr Einfluß auf die Solarzellenparameter vergleichsweise gering. Die Größen von  $j_{rg}$  und  $j_{shunt}$  bestimmen im wesentlichen Kurvenfüllfaktor ( $FF$ ) und Leerlaufspannung ( $V_{LL}$ ) und in Folge den Wirkungsgrad,  $\eta$  der Solarzelle.

---

<sup>\*)</sup> Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung von Shell Austria und dem Forschungsförderungsfonds für die Gewerbliche Wirtschaft durchgeführt.

$$\eta = \frac{P_{outmax}}{P_{inc}} \quad (2)$$

$$P_{outmax} = j_{KS} \times V_{LL} \times FF \quad (3)$$

$P_{outmax}$  ... Maximal abgegebene Leistung der Solarzelle

$P_{inc}$  ... Eingestrahelte Leistung

$j_{KS}$  ... Kurzschlußstromdichte

Für Diffusionslängen von 10 – 20  $\mu\text{m}$  kann unter AM1-Einstrahlung ( $P_{inc} = 90 \text{ mWcm}^{-2}$ ) mit Kurzschlußstromdichten von etwa  $20 \text{ mAcm}^{-2}$  gerechnet werden. Um einen Wirkungsgrad von mehr als 10 % zu erzielen ist daher ein Füllfaktor von mehr als 0.75 und eine Leerlaufspannung von mehr als 0.56 V erforderlich.

### 3) Experimentelle Ergebnisse

Die Substrate, die für die Arbeiten verwendet worden sind, kommen von 2 Firmen. SIEMENS-München stellte 2 Chargen von einkristallinen mg-Si Scheiben unterschiedlicher Qualität zur Verfügung:

- 1) mg-Si 2 x CZ gezogen (mg-Si I),  $L \sim 5 \mu\text{m}$ ,  $p$ -leitend
- 2) mg-Si 2 x CZ + 2 x FZ gezogen (mg-Si II), versetzungsfrei,  $p$ -leitend ( $L \sim 40 - 50 \mu\text{m}$ )
- 3) mg-Si aus speziellem Quarzsand hergestellt, versetzungsfrei,  $L \sim 15 \mu\text{m}$ ,  $n$ -leitend (mg-Si III).

Crystal Systems Co (USA) stellte uns 10 Scheiben ihres nach der Heat Exchanger Methode hergestellten Materials zur Verfügung. (HEM mg-Si), welches fast einkristallin ist,  $p$ -leitend mit einer hohen Anzahl von kristallinen Defekten,  $L > 10 \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse der auf diesen Substraten hergestellten Solarzellen sind in Fig.1 zusammengefaßt. mg-Si I scheidet als mögliches Substrat für diffundierte  $p$ - $n$ -Übergänge aus, da  $L \sim 5 \mu\text{m}$  zu klein ist um  $20 \text{ mAcm}^{-2}$  erreichen zu können. Die für mg-Si II gemessenen Diffusionslängen (40-50  $\mu\text{m}$ ) liegen nahe den Werten für Reinstsilizium. Als Folge sind die charakteristischen Kenngrößen ( $j_{KS}$ ,  $V_{LL}$  und  $FF$ ) denen vergleichbar, die mit Reinstsilizium erzielt worden sind. Solarzellen aus mg-Si III zeigen ebenfalls hohe Kurzschlußstromdichten ( $23 \text{ mAcm}^{-2}$ ), doch reduzieren hohe Rekombinationsstromdichten Füllfaktor und Leerlaufspannung erheblich. HEM mg-Si weist eine große Anzahl von Mikroeinschlüssen auf, welche zu Shunteeffekten führen und in der Folge Füllfaktor und Wirkungsgrad erheblich beeinträchtigen.

### 4) Zusammenfassung und Diskussion

- i) Es konnte gezeigt werden, daß die Herstellung von Solarzellen aus Ferrosilizium höherer Reinheit mit mehr als 10 % Wirkungsgrad möglich ist.
- ii) Können durch geeignete Maßnahmen bei der Solarzellenherstellung Rekombinationsstromdichten und Shunteeffekte reduziert werden, scheint eine billige und großtechnische Erzeugung von Solarzellen aus Ferrosilizium höherer Reinheit möglich.

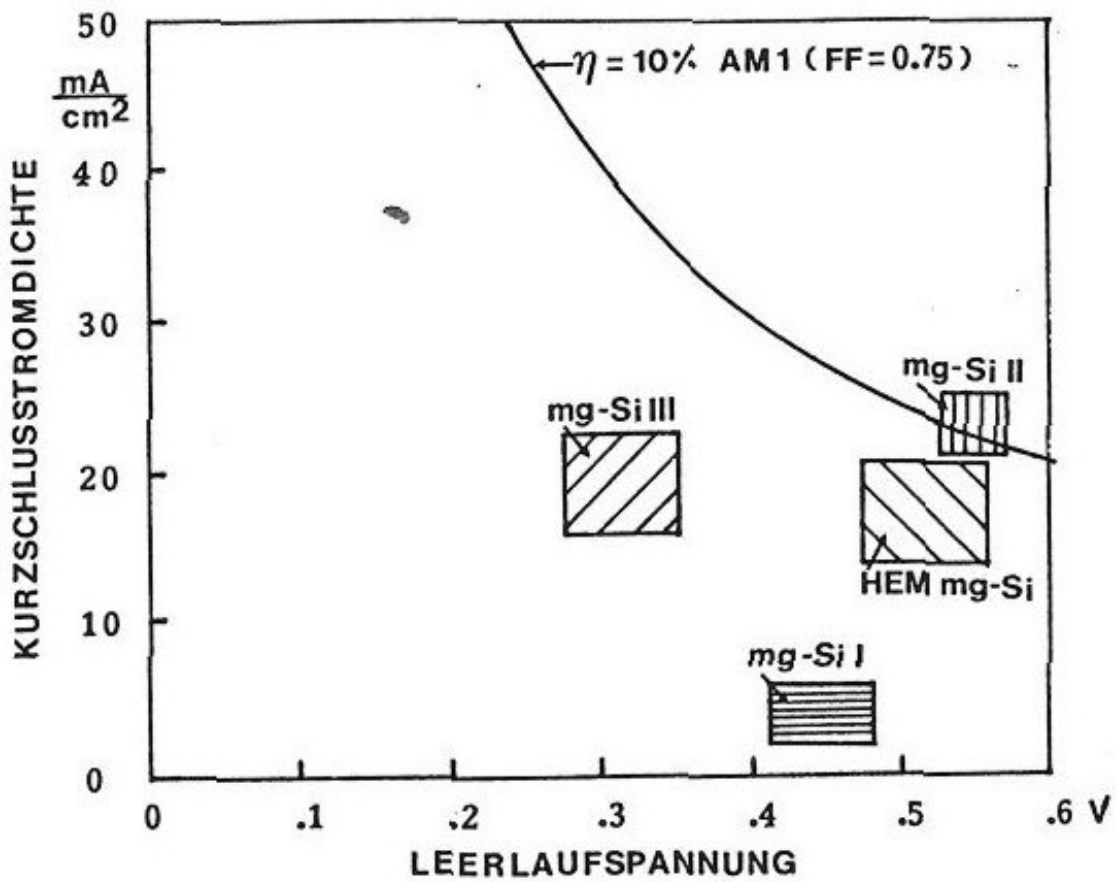


Fig. 1: Zusammenfassung der bisher erzielten Ergebnisse in einem  $j_{KS}$ - $V_{LL}$  Diagramm. Bezeichnungen siehe Text.  $P_{inc}$  für AM1 ist  $89mWcm^{-2}$