

Photonen-Management – Optische Strukturen

Einleitung

Eine bessere Ausnutzung des solaren Spektrums ist ein Schlüssel für höhere Wirkungsgrade von Solarzellen. Um dies zu erreichen, muss man mit Hilfe optischer Strukturen Photonen unterschiedlicher Energie sammeln und effizient einsetzen. Neben der Reduzierung der Reflexion spielen die Erhöhung der Absorption durch „Lichtfallen“ und die richtige „Verteilung“ der Photonen in die Absorberschichten beispielsweise bei Dünnschicht- und Stapelsolarzellen eine zentrale Rolle. Vergleichbare Anforderungen gelten auch für Hochleistungs- und Multispektral-Solarzellen.

sondern dazu beitragen, die Verluste in anderen Bereichen der Solarzellen zu minimieren.

Diese Anforderungen und auch die im Folgenden beschriebenen Lösungsansätze sind teilweise schon bekannt. Sie konnten aber oft aus technischen oder finanziellen Gründen nicht realisiert werden. Hier soll an Hand von Beispielen aufgezeigt werden, dass es notwendig und zielführend ist, mit neuen Erkenntnissen, neuen Materialien und neuen Techniken alte und neue Ideen umzusetzen und weiter zu entwickeln und so die Effizienz der Photovoltaik zu steigern und ihre Kosten zu reduzieren.

Dr. Reinhard Carius
FZ- Jülich
r.carius@fz-juelich.de

Dr. Thomas Dittrich
HMI
dittrich@hmi.de

Photonen-Management

Das auf die Erde einfallende Sonnenlicht setzt sich aus Photonen (Lichtquanten) sehr unterschiedlicher Energie oder Wellenlänge zusammen. Eine bessere Ausnutzung dieses solaren Spektrums ist ein Schlüssel für höhere Wirkungsgrade von Solarzellen. Unter Photonen-Management verstehen wir die effiziente Nutzung der Photonen für die Photovoltaik mit Hilfe optischer Strukturen:

- a) Durch **vollständige** Sammlung sollen alle für eine Ladungsträgererzeugung nutzbaren Photonen in die Solarzelle gelangen.
- b) Durch **Einsatz der Photonen am richtigen Ort** mittels Fokussierung und geeigneter Lichtfallen sollen sie in die Bereiche der Zellen gelenkt werden, in denen sie am effizientesten genutzt werden können. Ein Beispiel dafür sind Multispektralzellen wie z. B. Tandem- und Tripelzellen. Dort werden Photonen mit hoher Energie in den Zellen, die eine hohe offene Klemmspannung liefern, absorbiert und die Photonen mit geringerer Energie in den darunter liegenden Solarzellen [1, 2].
- c) Durch **Reduzierung der Verluste** in den verwendeten optischen Strukturen. Sie sollen selbst keine nutzbaren Photonen absorbieren,

Optik in Solarzellen

Die Leistungsbilanz einer handelsüblichen Solarzelle aus kristallinem Silicium (*Abb. 1*) zeigt, in welchen Bereichen die Optik und damit das Photonen-Management von Bedeutung ist.

Wichtige Verluste in der Solarzelle sind:

- Die Reflexion beträgt bei einer reinen Siliciumoberfläche für den relevanten Spektralbereich zwischen 30% und 40%. Durch Antireflexionschichten wird sie auf weniger als 5% reduziert.
- Durch Transmission gehen bei einem 300 Mikrometer dicken Siliciumwafer ca.

Reflexion & Transmission
Thermalisierung
$eV_{oc} < E_g$
Füllfaktor, Lebensdauer, Kontakte
Wirkungsgrad

*Abbildung 1
Leistungsbilanz einer Solarzelle aus kristallinem Silicium mit etwa 15% Wirkungsgrad. Die Flächen geben die entsprechenden prozentualen Anteile wieder.*

Abbildung 2

Externe Quantenausbeute einer typischen kommerziell erhältlichen Solarzelle (durchgezogene blaue Linie) im Vergleich zur besten Solarzelle aus kristallinem Silicium (Kreise)

33% der Photonen verloren. Durch geeignete Rückseitenverspiegelung und Lichtfallen lässt sich dies auf weniger als 26% verringern. Diese 26% der Photonen machen allerdings nur knapp 20% der Strahlungsleistung des Solarspektrums aus, da es sich um Photonen mit niedriger Energie handelt.

- Als Thermalisierung (Erwärmung) bezeichnet man den Verlust der Überschussenergie der Ladungsträger durch ihre optische Anregung mit Energien größer als die Bandlücke des Halbleiters. Für ein spezifisches Halbleitermaterial kann die Optik dies nicht beeinflussen. Wie später näher erläutert wird, können die Thermalisierungsverluste jedoch durch die Verwendung von Multispektralzellen stark reduziert werden [3]. Dabei spielt die richtige Verteilung der Photonen in die verschiedenen Bereiche der Zelle durch eine angepasste Optik eine wesentliche Rolle.
- Die erreichbare offene Klemmenspannung V_{oc} und damit die nutzbare potenzielle Energie der Ladungsträger, $e V_{oc}$, ist aus physikalischen Gründen immer niedriger als die Bandlücke des Halbleiters E_g . Die Differenz wird jedoch mit zunehmender Anzahl der erzeugten Ladungsträger pro Volumen (Ladungsträgerdichte) immer kleiner. Durch den Einsatz von Optik in Form von Konzentratoren und Lichtfallen kann man die Ladungsträgerdichte erhöhen und damit diese Verluste reduzieren.

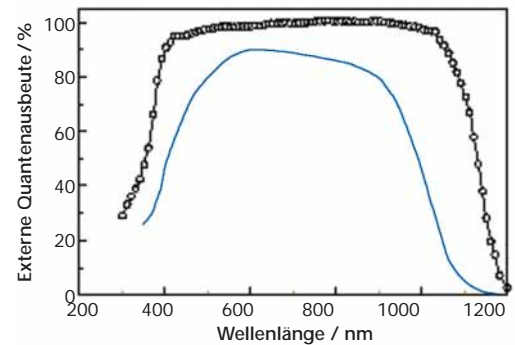
Kristalline Silicium-Solarzelle

In Abb. 2 sind die Quanteneffizienzen einer typischen kommerziellen Solarzelle aus kristallinem Silicium und die einer so genannten Weltrekordzelle [4] mit einem Wirkungsgrad von 24,7% zum Vergleich gezeigt. Die Weltrekordzelle hat eine deutlich höhere Quanteneffizienz in einem sehr weiten Spektralbereich und dies aus folgenden Gründen:

- Ein Teil der Verbesserung bei kurzen Wellenlängen ist auf die Verringerung der Absorption der n-Schicht und geeignete Kontaktstrukturen zurückzuführen.
- Die starke Erhöhung im Bereich von 1000 nm – 1200 nm wurde durch optimierte Lichtfallen erreicht, die zu einer bis zu

25-fachen Verlängerung des effektiven Lichtweges führen.

- Mit einer Reduzierung der Reflexion auf nahezu 0% wird eine Quantenausbeute von fast 100% über einen sehr weiten Spektralbereich erreicht.



Das Photonen-Management in Form einer effektiven Lichteinkopplung und -verteilung führt hier zu einer Kurzschlussstromdichte von $42,2 \text{ mA/cm}^2$, d.h. etwa 80% der auf die Solarzelle einfallenden Photonen werden genutzt. Im Vergleich dazu liefert eine kommerzielle Solarzelle etwa 32 mA/cm^2 .

Dünnschicht-Solarzellen

Für effiziente Dünnschicht-Solarzellen ist das Photonen-Management von essentieller Bedeutung. Einerseits müssen dort die Schichtdicken aus Kostengründen, oder auch wegen der elektronischen Eigenschaften der Materialien sehr dünn sein. Andererseits muss ein möglichst großer Teil des nutzbaren Sonnenlichts absorbiert werden, um einen hohen Photostrom zu erzeugen. Im Folgenden wird der Einsatz des Photonen-Managements in Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silicium erläutert. Viele der Problemlösungen sind direkt auf andere Dünnschicht-Solarzellen, z. B. aus Chalkopyriten, CdTe, oder kristallinem Silicium übertragbar.

Die Aufgabenstellung ist: Mit einer minimalen Schichtdicke soll der größte Teil des Sonnenlichts in der aktiven Schicht der Solarzelle absorbiert und damit ein möglichst großer Photostrom erzeugt werden. In Abb. 3 ist der Aufbau einer hochentwickelten Tandemzelle aus zwei p-i-n Solarzellen gezeigt. Auf einem Träger aus Glas

mit einer porösen Antireflexschicht ist zunächst eine transparente, elektrisch leitfähige Schicht (TCO) aus Zinkoxid (ZnO) aufgebracht. Dieses ZnO ist ein polykristallines Material und wird durch einen chemischen Prozess texturiert (aufgeraut). Auf dieser Schicht sind zwei Solarzellen mit einer p-i-n Schichtfolge übereinander abgedichtet. Darauf folgt eine weitere TCO-Schicht und eine Schicht aus Silber, beide **zusammen** bilden den Rückseitenreflektor.

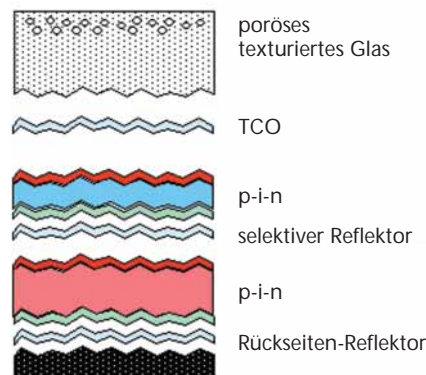


Abbildung 3

Aufbau einer hochentwickelten Tandemzelle aus zwei p-i-n Solarzellen mit Antireflexbeschichtung, Lichtfalle und selektivem Reflektor

Bei einfachen Dünnschicht-Solarzellen muss die aktive Absorberschicht einen möglichst großen Anteil des einfallenden Lichts absorbieren, das zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren führt. Bei Absorbieren aus Halbleitermaterial mit einer sogenannten „direkten“ Bandlücke (z. B. GaAs, Cu(In,Ga)(S,Se)₂) ist typischerweise eine Schichtdicke von etwa 1 Mikrometer ausreichend um mehr als 80% der Photonen mit der Energie der Bandlückenenergie (oder höher) zu absorbieren. Bei Material mit „indirekter“ Bandlücke (z. B. Silicium) sind dafür mehr als 100 Mikrometer Schichtdicke notwendig. Amorphe Halbleitermaterialien, wie amorphes Silicium (a-Si:H) oder amorphe Silicium-Germanium Legierungen haben bei Energien oberhalb der Bandlücke ein ähnliches Absorptionsverhalten wie direkte Halbleiter, d. h. auch hier reichen Schichtdicken in der Größenordnung von 1 Mikrometer für eine hohe Absorption aus. Allerdings gibt es hier zwei Aspekte, die berücksichtigt werden müssen:

- Die elektronischen Eigenschaften dieser Materialien begrenzen die maximale Schichtdicke auf etwa 100–200 nm.
- Der Absorptionsverlauf ermöglicht die Erzeugung beweglicher Ladungsträger auch mittels Photonen mit etwas niedrigeren Energien als der Bandabstand, die dann zum Photostrom der Solarzelle beitragen.

Auch aus Kosten- und Materialeinsparungsgründen sind kleine Schichtdicken für alle genannten Materialklassen äußerst wünschenswert. Um bei gegebener Schichtdicke die Absorption zu erhöhen, muss man den Weg des Lichts in der Absorberschicht verlängern. Die einfachste Möglichkeit ist der Einsatz eines Rückseitenreflektors, der bei fast hundertprozentiger Reflexion den effektiven Weg des Lichts etwa verdoppelt. Eine Strukturierung der

Oberfläche, wie sie in *Abb. 3* gezeigt ist, führt in Verbindung mit einem optimierten Reflektor zu einer weiteren Verlängerung des Lichtweges. Durch diese Maßnahmen (Lichtfalleneffekt oder „light-trapping“ genannt) wird das Licht viel stärker absorbiert als es durch die Schichtdicke zu erwarten ist.

Bereits 1974 wurde diese Technik mit strukturiertem Rückseitenreflektor für dünne Solarzellen aus kristallinem Silicium beschrieben und an einer 1 Mikrometer dicken Solarzelle eine 10-fache Verlängerung des Lichtweges mittels eines Rückseitenreflektors aus transparentem Kunststoff mit aluminiumbeschichteten Rillen demonstriert [5]. Der Effekt der internen Reflexion an inhomogenen und texturierten Schichten wurde erst später mittels statistischer Optik beschrieben [6]. Erste Anwendungen bei Dünnschicht-solarzellen aus amorphem Silicium wurden bereits in der Literatur beschrieben [7].

Aus theoretischen Überlegungen erhält man eine Erhöhung der Volumenabsorption im Bereich schwacher Absorption gemäß $4n^2$, wobei n der Brechungsindex bei der entsprechenden Wellenlänge ist. Würde man eine Siliciumschicht zwischen Luftschichten betten, ergäbe sich eine Erhöhung der Volumenabsorption um den Faktor 50. Für die gleiche Schicht eingebettet in typische Passivierungsschichten SiO₂ oder Si₃N₄ bzw. auf Glas beträgt die Absorptionserhöhung noch etwa den Faktor 16–20. Bei der Berechnung wurde allerdings vorausgesetzt, dass das Licht an den Grenzflächen zu den Nachbarmedien total reflektiert wird. Bei Schichtdicken (d) deutlich größer als die effektive Lichtwellenlänge ($d \gg \lambda/n$) ist diese Annahme gerechtfertigt, bei Schichtdicken mit $d \leq \lambda/n$ ist sie bisher nicht nachgewiesen. Die physikalische Beschreibung

und das Verständnis des light-trappings ist bei $d \leq \lambda/n$ bisher noch unzureichend. Bei den heute typischen Schichtdicken für Stapelzellen aus amorphem Silicium und seinen Legierungen mit $d \approx 80-200$ nm und $n = 3,4$ befindet man sich für den relevanten Wellenlängenbereich von etwa 800 nm genau in diesem kritischen Schichtdickenbereich und die Optimierung erfolgt durch trial and error (Versuch und Irrtum).

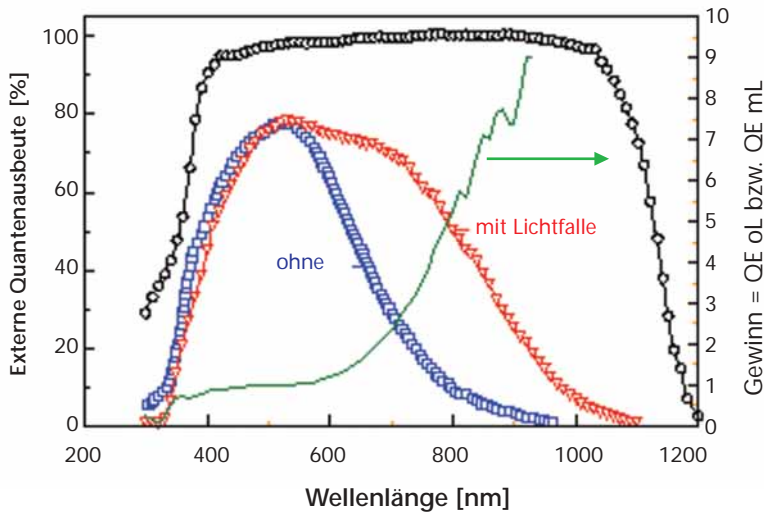
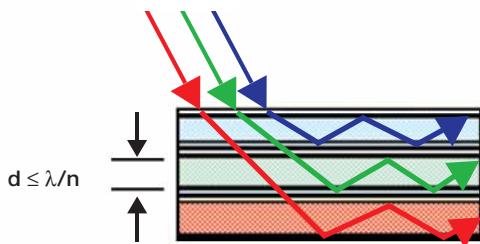


Abbildung 4
Externe Quantenausbeute von zwei 1 Mikrometer dünnen Solarzellen aus mikrokristallinem Silicium mit (▽) und ohne (□) Lichtfalle im Vergleich der 300 Mikrometer dicken optimierten Solarzelle („Weltrekordsolarzelle“) (○). Der Gewinn (rechte Achse) an Quantenausbeute durch Lichtfallen ist durch die grüne Kurve dargestellt.

Wie gut Lichtfallen in Dünnschichtszellen bereits funktionieren, ist in *Abb. 4* gezeigt. Dort ist die externe spektrale Quantenausbeute für eine Dünnschichtszelle aus mikrokristallinem Silicium mit und ohne Lichtfalle im Vergleich zu der Weltrekordzelle aus *Abb. 2* dargestellt. Die Lichtfalle wird hier durch das texturierte ZnO mit einem guten Rückseitenreflektor realisiert (ein Rückseitenreflektor aus Chrom mit einer sehr schlechten Reflexion dient hier als Referenz). Der Gewinn an Quantenausbeute durch die Lichtfalleneffekte, d. h. das Verhältnis von Ausbeute mit Lichtfallen (mL) zur Ausbeute ohne Lichtfallen (oL) ist ebenfalls gezeigt (rechte Achse). Er steigt deutlich zu größeren Wellenlängen, d. h. in Richtung schwacher Absorption, und beträgt hier bis zu einem Faktor 9. Man erkennt aber auch, dass die bisher erreichte externe Quantenausbeute selbst im Bereich starker Absorption erheblich geringer ist, als die der Rekordzelle. Dies zeigt sich auch bei der Kurzschlussstromdichte von etwa 22 mA/cm² für diese 1 Mikrometer dicke mikrokristalline Solarzelle. Damit ist klar, dass trotz der eindrucksvollen Ergebnisse der texturierten Schichten bezüglich des Lichteinfangs Verbesserungen durch Forschung und Entwicklung weiter erforderlich sind.

Bei Stapelsolarzellen (Tandem-, Tripelzellen, usw.) sind außer einem möglichst guten Lichteinfang weitere Randbedingungen zu erfüllen. Da die übereinanderliegenden Zellen dort im Allgemeinen im elektrischen Kontakt, d. h. seriell verschaltet sind, muss in allen Teilzellen der gleiche Photostrom erzeugt werden, um eine Begrenzung der Stromausbeute durch eine Teilzelle zu verhindern. Dies lässt sich grundsätzlich durch eine Anpassung der Absorberschichtdicken in den Teilzellen erreichen. Für eine optimale Nutzung des Sonnenspektrums ist es aber erforderlich, mit einer gegebenen Photonenenergie die größtmögliche Zellenspannung zu erzeugen, d. h. eine Absorberschicht soll nach Möglichkeit alle verfügbaren Photonen absorbieren, die zu einer Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren ausreichen. Nur die Photonen, die dafür nicht ausreichen, sollen die Schicht durchdringen und in den tieferliegenden Zellen Photostrom erzeugen. Um dies in einer Stapelzelle zu erreichen, müssen transparente, selektiv reflektierende Schichten eingefügt werden, die nur die gewünschten Photonen effizient reflektieren, alle anderen aber hindurchlassen. Zusätzlich müssen diese Eigenschaften unabhängig vom Einfallswinkel des Lichts sein und die Wellenlänge, bzw. Photonenenergie der Reflexion muss sich an die verschiedenen Materialien anpassen lassen. Darüber hinaus müssen diese Schichten den Strom gut leiten und mit den Herstellungsprozessen der Solarzellen kompatibel sein.

Schichten, die zumindest einen Teil dieser Anforderungen erfüllen, sind bereits verfügbar und werden auf großen Flächen hergestellt. Beispielsweise werden selektiv reflektierende Schichten aus TiO₂ und SiO₂ für verschiedenste Anwendungen wie Kaltlichtspiegel in Halogenlampen oder Farbtrennfilter eingesetzt und sind grundsätzlich mit der Silicium-Dünnschichttechnologie kompatibel. Um die anderen erforderlichen Eigenschaften für die hier skizzierten Anwendungen z. B. die hinreichende elektrische Leitfähigkeit und eine winkelunabhängige Reflexion zu erreichen, sind allerdings noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Ob sich mit der zur Zeit genutzten Technologie einfacher planarer Schichtenfolgen die gewünschten Eigenschaften überhaupt realisieren lassen, ist unklar; auch



welchen Einfluss die Textur auf die selektive Reflexion hat, ist noch unbekannt.

Zur Lösung der hier aufgezeigten Probleme können Ansätze aus dem sehr aktuellen Forschungsgebiet der photonischen Kristalle dienen. Als Beispiele seien hier Kolloid-Kristalle aus SiO_2 -Kügelchen mit 300 nm Durchmesser genannt, dessen selektive Transmission sich mit dem Grad der Ordnung verändert, oder selektive Reflektoren mit kugelförmiger Richtcharakteristik oder Bragg-Reflektoren zur effizienten Einkopplung von Licht in Wellenleiterstrukturen. Neue Strukturierungsverfahren auf der Nanometerskala, wie z. B. das „Mikrokontaktprinting“ und „selbstorganisierte“ Strukturen haben das Potenzial, kostengünstig auf große Flächen anwendbar zu sein und damit neue Wege für das Photonen-Management zu eröffnen.

Sowohl bei der Berechnung der optischen Eigenschaften von Strukturen auf der Nanometerskala, als auch bei der Realisierung solcher Systeme ist eine Zusammenarbeit der Forschung für Solarzellen mit der Forschung für photonische Bauelemente, wie sie z. B. im Vernetzungsprojekt „Photonen-Management und Bandstruktur-Design für effizientere Solarzellen“ stattfindet, unverzichtbar.

Zusammenfassung

Der effektive Einsatz der Photonen des solaren Spektrums durch ein Photonen-Management ist eine wesentliche Voraussetzung für bessere Wirkungsgrade von Solarzellen. Dies gilt insbesondere für Dünnschicht-Solarzellen, die das Potenzial haben, durch geringen Materialeinsatz, niedrige Prozesstemperaturen, die Verwendung von preiswerten Materialien und integrierte Serienschaltung auf großen Flächen einen steigenden Beitrag zur Energieversorgung mit erneuerbaren Energien zu leisten. Dazu müssen

die bereits bisher genutzten Effekte und Verfahren, wie Anti-Reflexbeschichtung und Lichtfallen weiter verbessert und neue Methoden entwickelt werden. Die Komplexität der Anforderungen an die Schichten und Materialien erfordern teilweise neue Ansätze mit nanostrukturierten Systemen. Hier sind Forschung und Entwicklung in Zusammenarbeit mit anderen Fachgebieten, insbesondere der Materialforschung und Photonik, unverzichtbar.

Danksagung

Arbeiten zum Photonenmanagement werden teilweise im Rahmen des Vernetzungsprojekts „Photonen Management und Bandstrukturdesign für effizientere Solarzellen“; Förderkennzeichen 01SF0120 gefördert. Wir danken unseren Kollegen im FZ-Jülich und im HMI Berlin, sowie unseren Partnern im Vernetzungsprojekt für ihre Unterstützung.

Literatur

- [1] B. Rech und P. Lechner, dieser Band, S. 17
- [2] W. Fuhs, dieser Band, S. 42
- [3] J. Zhao, A. Wang and M. A. Green, „24.7 % Efficient PERL Silicon Solar Cells and Other High Efficiency Solar Cell and Module Research at the University of New South Wales“, ISES Solar World Congress, Jerusalem, Israel, July 4–9, 1999
- [4] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000
- [5] D. Redfield, Applied Physics Letters, Vol. 25 (1974) p. 647 ff.
- [6] E. Yablonovic, J. Opt. Soc. Am., Vol. 72 (1982) p. 899 ff.
- [7] E. Yablonovic, G. D. Cody, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-29, No. 2 (1982) p. 300 ff.

*Abbildung 5
Idealisierter Verlauf des
Lichts unterschiedlicher
Wellenlänge in einer
Dünnschicht-Dreifach-
Stapelzelle*