

Solarmodul auf der Sonnenbank

Auf Siliziumwafern basierende Photovoltaikzellen können noch nach abgeschlossener Herstellung mikroskopisch kleine Defekte im Silizium bilden, die den Wirkungsgrad der Solarmodule mindern. Dennoch machen Siliziumzellen weltweit mit Abstand den größten Marktanteil in der photovoltaischen

Stromerzeugung aus. Die Motivation, diesen Defekten entgegen zu wirken, ist daher hoch.

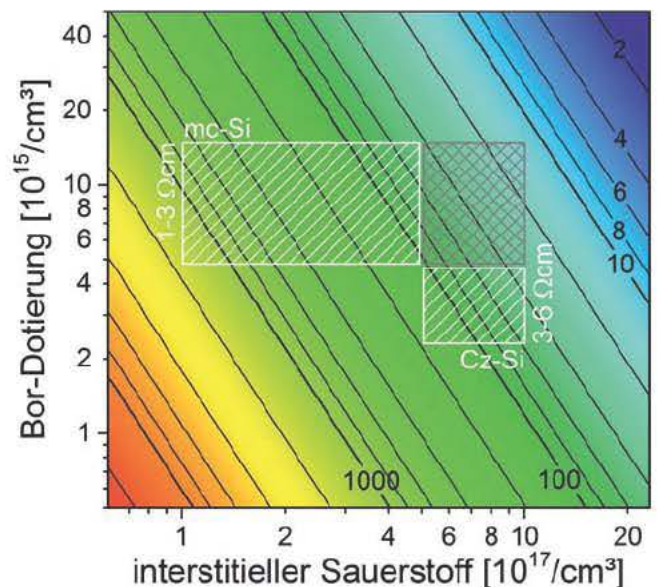
Lichtempfindliche Solarzellen

Eine spezielle Klasse von Defekten bildet sich gerade bei Bedingungen, unter denen

eine Solarzelle im Betrieb gut funktionieren sollte: bei Beleuchtung und Temperaturen bis 75 °C. Damit verknüpfte Wirkungsgradverluste werden unter dem Überbegriff lichtinduzierte Degradation (LID) zusammengefasst. Während sich die Defekte bilden, sinken die elektrischen Kenngrößen der Solarzelle (Kurzschluss-

WISSENSWERT

Diffusionslänge und ORC. Nahezu alle industriell hergestellten Solarzellen besitzen einen mit Phosphor dotierten, mikrometerdicken Emitter auf der Vorderseite. Freie Elektronen, die durch Absorption von Licht in der Basis generiert werden, müssen den Emitter erreichen, um zur Leistung der Solarzelle beitragen zu können. In der Basis bewegen sich Elektronen durch Diffusion. Die Diffusionslänge gibt statistisch betrachtet diejenige Strecke an, die ein Elektron zurücklegt, bevor es in der Regel an Defekten rekombiniert und damit nicht mehr zur Verfügung steht. Zwar übersteigt in den heutigen, etwa 170 µm dünnen Solarzellen die Diffusionslänge die Zelldicke häufig, dennoch erreichen nicht alle Elektronen den Emitter, da die Rückseite der Solarzelle einem großen rekombinationsaktiven Defekt gleichkommt. Deren Aktivität lässt sich über die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit beschreiben. Klassisch auf der Rückseite vollflächig mit Al/Si legierte Solarzellen erreichen ORC-Werte um 500 cm/s, während Zellen mit dielektrisch passivierter Rückseite (Passivated Emitter and Rear Cell, PERC) Werte um 50 cm/s aufweisen.



1 | Lebensdauer (in µs): Mit zunehmendem Bor- und Sauerstoffgehalt sinkt die Lebensdauer [1]

strom, offene Klemmspannung und Wirkungsgrad) exponentiell.

Ein Beispiel für LID ist der mit Bor-Sauerstoff (BO) korrelierte Defekt. Dieser ist wirtschaftlich sehr relevant, weil er das ansonsten hochwertige Czochralski-Verfahren betrifft. Das dabei entstehende einkristalline Material Cz-Si ist im Kristallzuchtprozess zwangsläufig stark mit Sauerstoff kontaminiert ($5 \text{ bis } 10 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) und typischerweise mit Bor grunddotiert. Binnen gut einer Woche fällt der Wirkungsgrad ab, wobei das Maß des Leistungsverlusts von Bor- und Sauerstoffgehalt im Silizium abhängt. Bothe et al. [1, 2] haben eigene und fremde Daten zusammengetragen und eine Worst-Case-Abschätzung veröffentlicht, nach der die Defektdichte nach abgeschlossener Degradation etwa linear mit dem Borgehalt und quadratisch mit dem Sauerstoffgehalt skaliert. Die ursprüngliche Vermutung, dass sich ein Sauerstoff-Dimer an ein Boratom lagert, scheinen neuere Ergebnisse jedoch zu widerlegen. Möglicherweise verändert ein bereits im Material vorhandener, aber noch elektronisch inaktiver Defekt seine Konfiguration und geht in einen schädlichen Zustand über.

Lebensdauer, Diffusionslänge und Klemmspannung

Defekte im Halbleiter reduzieren die Lebensdauer der Minoritätsladungsträger (Bild 1). In Cz-Si der Spezifikation 1 bis $3 \Omega\text{cm}$ (graues Feld), welche in etwa der

FAZIT

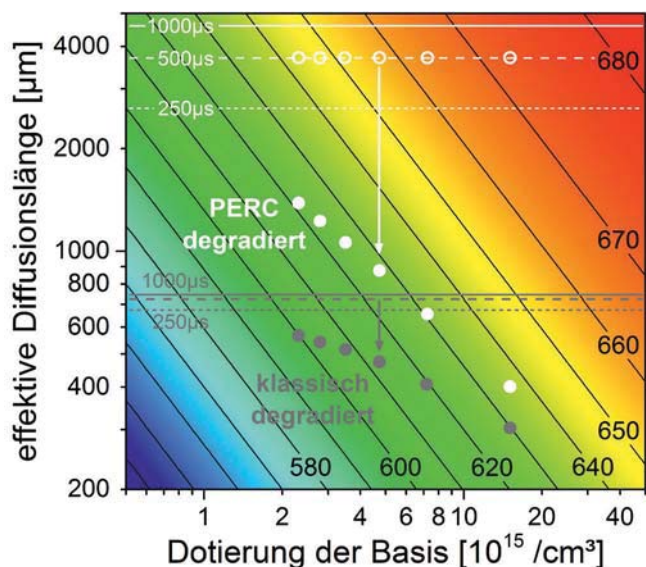
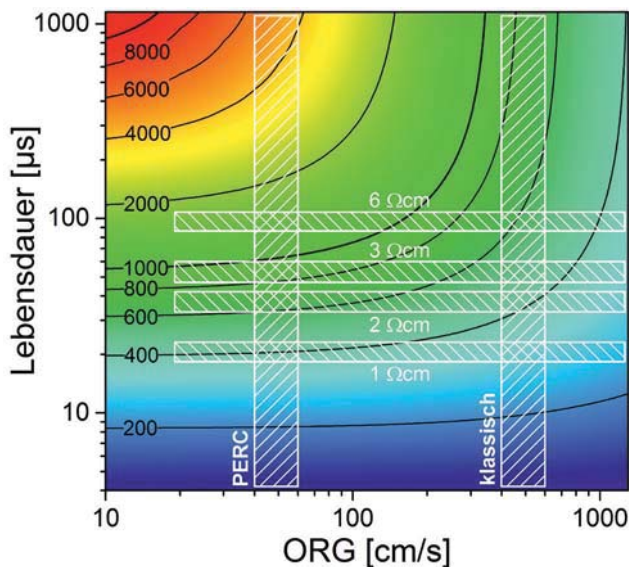
Die richtige Strahlendosis. Im bewährten Czochralski-Verfahren hergestellte Siliziumwafer enthalten Bor und Sauerstoff. Diese bewirken Defekte im Halbleiter, welche die Lebensdauer und damit die Diffusionslänge der Ladungsträger reduzieren – und so die Leistung der Solarzelle verringern. Die Degradation setzt nach der Herstellung unter dem Einfluss von Licht und Wärme ein. Forscher haben entdeckt, dass sich die Zellen bei stärkerer Bestrahlung wieder erholen. Bei Temperaturen über $200 \text{ }^\circ\text{C}$ destabilisiert sich der regenerierte Zustand jedoch wieder. Unterstützt vom TLB entwickelt die Uni Konstanz einen Durchlaufofen, der die Zellen kontrolliert heizt und beleuchtet.

Verteilung entlang eines gezogenen Kristalls entspricht, beträgt die Lebensdauer der Ladungsträger nach Degradation einige zehn Mikrosekunden. Daher liegt die degradierte Lebensdauer von stark dotiertem Cz-Si oftmals unterhalb der von gleich stark dotiertem, aber herstellungsbedingt schwächer mit Sauerstoff kontaminierten multikristallinem Material (mc-Si). Allerdings limitieren in mc-Si meistens andere Defekte sowie Korngrenzen die Lebensdauer auf Werte unterhalb der im Bild gezeigten. Normalerweise wird daher schwächer dotiertes Cz-Si mit 3 bis $6 \Omega\text{cm}$ verwendet, um die Degradation möglichst gering zu halten.

Bild 2 zeigt die effektiven Diffusionslängen unter Berücksichtigung der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit (ORG) und der Lebensdauer für unterschiedlich starke Basisdotierung (mehr zu Diffusionslänge und ORG im Wissenskasten). Das klassische Konzept erreicht

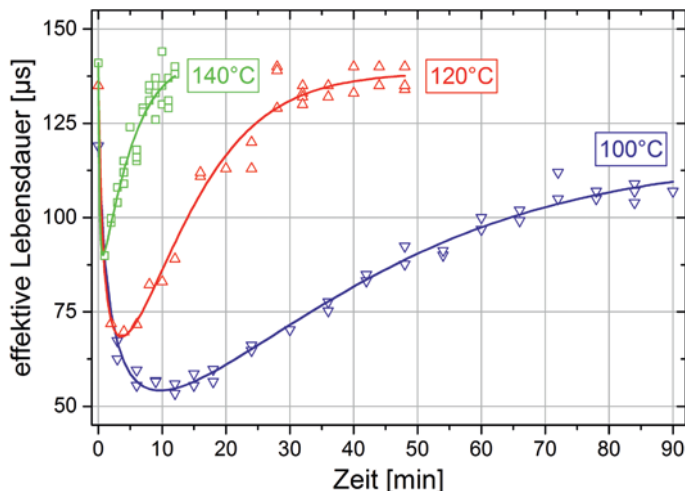
eine Sättigung bei Werten um 600 bis $800 \mu\text{m}$. Größere effektive Diffusionslängen verhindert die recht hohe ORG. Im Gegensatz dazu kann bei PERC-Zellen die effektive Diffusionslänge erheblich größere Werte annehmen.

Die effektive Diffusionslänge bestimmt zusammen mit der Grunddotierung die erreichbare offene Klemmspannung (Bild 3). Mit dem PERC-Konzept sind ebenso wie mit stärkerer Grunddotierung generell höhere Spannungen zu erreichen. Die relativen Gewinne oder Verluste in der Spannung lassen sich direkt auf den Wirkungsgrad übertragen, wobei auch der Kurzschlussstrom leicht betroffen ist. Eingezeichnet ist, wie stark die Spannung aufgrund der BO-Degradation abnimmt, wobei die Verluste bei schwächerer Grunddotierung in der Rechnung eher überschätzt sind. PERC-Zellen weisen stets höhere Verluste auf, und je stärker die Dotierung ist,

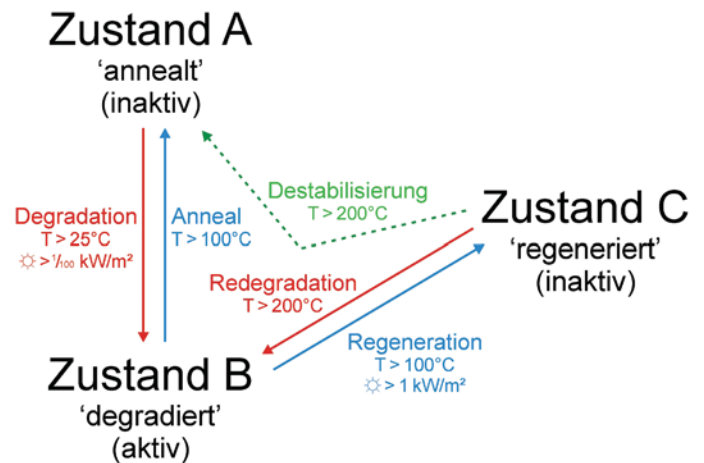


2 | Effektive Diffusionslänge (in μm): Im PERC-Konzept kann die Diffusionslänge deutlich höhere Werte annehmen als im klassischen

3 | Klemmspannung (in mV): Im Vergleich zum klassischen lassen sich mit dem PERC-Konzept bei ähnlicher Lebensdauer höhere Spannungen erzielen, die Degradation relativiert diesen Vorteil jedoch



4 | **Regeneration:** Lebensdauerentwicklung während des Degradations-Regenerations-Zyklus bei unterschiedlichen Temperaturen [3]



5 | **Reaktionsschema:** Der durch Lichteinstrahlung und erhöhte Temperatur entstandene BO-Defekt regeneriert bei stärkerer Bestrahlung wieder [3]

desto geringer der Vorteil des PERC-Konzepts gegenüber dem klassischen Konzept.

Für Hersteller stellen sich nun die Fragen: Lohnt sich die Umrüstung der Produktion überhaupt, wenn die Herstellung einer PERC-Zelle mehr Arbeitsschritte erfordert (und damit teurer ist), aber die Degradation den Vorteil des PERC-Konzepts größtenteils zunichte macht? Ist es sinnvoller, PERC-Zellen aus mc-Si anstelle von Cz-Si herzustellen, allerdings mit dem Risiko, dass die Materialqualität stärker variiert?

Zumindest die zweite Frage scheint leicht zu beantworten zu sein. Vor kurzem wurde auch bei mc-Si-PERC-Zellen eine erhebliche lichtinduzierte Degradation festgestellt, die wohl nicht (nur) auf BO-Defekte zurückzuführen ist.

Höchste Zeit für Gegenmaßnahmen

An dieser Stelle könnte die Geschichte zu Ende sein, das PERC-Konzept auf Cz-Si praktisch vor dem Aus stehen und damit auch die stetige Wirkungsgradsteigerung der letzten Jahre merklich nachlassen – hätte es nicht vor einigen Jahren eine überraschende Entdeckung an der Universität Konstanz gegeben [3]: Unter starker Beleuchtung und erhöhten Temperaturen lassen sich die BO-Defekte in einen harmlosen Zustand überführen.

Nach der Degradation steigt die Lebensdauer der Ladungsträger wieder an und sättigt nahezu auf dem Ausgangsniveau vor der Degradation (**Bild 4**). Der Zustand nach dieser Regeneration unter-

scheidet sich vom Ausgangszustand allerdings in einem wichtigen Punkt: Der regenerierte Defekt ist nach bisherigem Kenntnisstand unter den Betriebsbedingungen der Solarzelle zeitlich stabil. Der Regenerationsprozess ermöglicht es somit prinzipiell, die BO-Defekten geschuldete Lebensdauerlimitierung dauerhaft zu überwinden, um das volle Potenzial des PERC-Konzepts ausnutzen zu können.

Die Uni Konstanz arbeitet an der industriellen Umsetzung des Regenerationsverfahrens – etwa in Form eines Durchlaufofens, in dem die Solarzelle eine beheizte und beleuchtete Strecke durchläuft. Erste Prototypen befinden sich derzeit in der Erprobung. Das wirtschaftliche Potenzial der Regeneration ist enorm: Wird der Degradationsverlust von 1 % fast vollständig aufgehoben, bedeutet dies einen Ertragsgewinn bezogen auf die zusätzliche Leistung von circa 5 %, bei einer 100-MW_{peak}-Linie also deutlich über eine Million Euro pro Jahr.

Generell beschleunigen hohe Temperaturen und Beleuchtungsintensitäten die Defektumwandlung. Zusätzlich scheint Wasserstoff bei der Umwandlung des Defekts in den regenerierten Zustand eine Rolle zu spielen. Allerdings weist die Reaktionskinetik des Defekts (**Bild 5**) noch einen nachteiligen Effekt auf. Bei höheren Temperaturen setzt eine Gegenreaktion (Redegradation) ein, die den regenerierten Zustand wieder destabilisiert. Letztendlich läuft es auf ein Optimierungsproblem hinaus: Damit der Durchlaufofen nicht zu groß und die Behandlungsdauer zu lang wird, sind so viel Licht und Wärme wie möglich zuzuführen, ohne dass die Gegenreaktion einsetzt. skr

Literatur

- 1 K. Bothe et al.: Fundamental Boron-Oxygen-Related Carrier Lifetime Limit in Mono- and Multicrystalline Silicon; Prog. Photovoltaics 13 (287), 2005
- 2 K. Bothe, J. Schmidt: Electronically Activated Boron-Oxygen-Related Recombination Centers in Crystalline Silicon; J. Appl. Phys. 99 (013701), 2006
- 3 A. Herguth, G. Hahn: Kinetics of the Boron-Oxygen Related Defect in Theory and Experiment; J. Appl. Phys. 108 (114509), 2010