

Hocheffiziente Solarzellen durch selektive Kontakte



Fraunhofer ISE
Dr. Anamaria Moldovan
anamaria.moldovan@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Kaining Ding
k.ding@fz-juelich.de

Prof. Dr. Uwe Rau
u.rau@fz-juelich.de

ISFH
Prof. Dr. Robbi Peibst
peibst@isfh.de

HZB
Dr. Lars Korte
korte@helmholtz-berlin.de

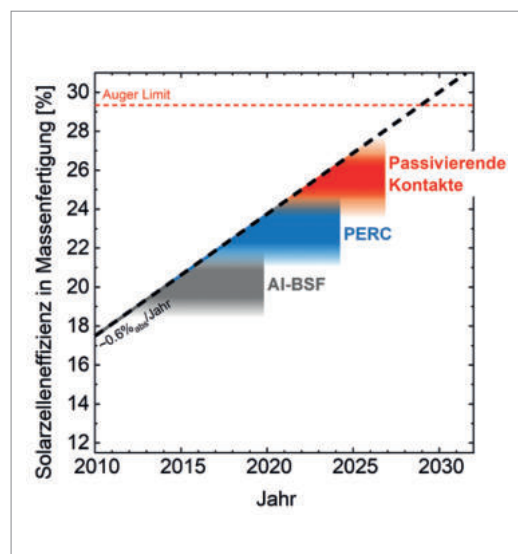
Prof. Dr. Bernd Stannowski
bernd.stannowski@helmholtz-berlin.de

Es ist sehr positiv zu beobachten, dass neben der Modulfertigung auch wieder Zellfertigungs-Linien in Europa auf- oder ausgebaut werden. Dies bringt viele Chancen, aber auch Herausforderungen mit sich. Daher ist es sehr wichtig, dass Forschungsinstitute zur Stärkung einer industriellen Wertschöpfung in Europa Forschungsfragenstellungen über alle Technologiereifegrade (TRLs) für und gemeinsam mit Industriepartnern adressieren und vorantreiben.

Die wichtigsten Aspekte hierbei sind:

- Transfer der neuesten Photovoltaiktechnologien in die Produktion
- Etablierung von vereinfachten Wegen zur Prozess- und Qualitätskontrolle sowie Optimierung durch digitale Maßnahmen
- Erarbeiten von ressourcenschonenden Alternativen zu etablierten Produktionsprozessen (geringerer Materialverbrauch und somit reduzierte Kosten und verbesserte Ökobilanz)
- Entwicklung von höchsteffizienten Solarzellenarchitekturen und Modulfertigung sowie neuer Konzepte der „übernächsten“ Solarzell-Generation

In **Abbildung 1** ist die „Lernkurve“ der Wirkungsgradsteigerung in der Solarzellen-Massenfertigung im zeitlichen Verlauf dargestellt. Diese Wirkungsgradsteigerung liegt aktuell bei ca. 0,6% pro Jahr (Fertig et al. 2017; Hermle 2017).



Die in den 1980er Jahren entwickelte PERC-(Passivated Emitter and Rear Concept) Technologie (Blakers 2019) ist auch heute noch aktueller Standard in der Produktion mit einem Anteil von ca. 65% und besten Durchschnittswirkungsgradwerten in der Fertigung von ca. 22,9% (Zhang et al. 2020). Die Wirkungsgradsteigerung dieser Technologie in den nächsten Jahren ist jedoch limitiert.

Zellkonzepte basierend auf selektiven passivierenden Kontakten wie Silizium Heterojunction (SHJ oder HJT) oder Siliziumoxid-Poly-Silizium basierte Technologien (Tunnel Oxide Passivated Contacts TOPCon (Feldmann et al. 2013; Feldmann et al. 2014; Feldmann 2015), Poly-Silicon on Oxide POLO (Römer et al. 2014; Peibst et al. 2014) und Weitere) haben im Labormaßstab bereits Wirkungsgrade von über 26% gezeigt (26,7% HJT-IBC (IBC: interdigitated back contact) (Yoshikawa et al. 2017), 26% TOPCon beidseitig kontaktiert (Richter et al. 2021), 26,1% POLO-IBC (Haase et al. 2018)) und sind dabei, in der industriellen Fertigung in Bezug auf den Wirkungsgrad die PERC-Technologie zu überholen. Zukünftig werden sie einen wachsenden Marktanteil erlangen (VDMA 2020).

Zellkonzepte mit selektiven passivierenden Kontakten haben diese Besonderheiten:

- Der Kontakt ist sehr selektiv durchlässig für den Transport von Ladungsträgern einer Polarität.
- Die Grenzfläche zwischen Kontakt und dem Silizium-Wafer, in dem die Ladungsträger generiert werden, wird durch den applizierten Schichtstapel sehr gut passiert.
- Gleichzeitig liegt kein direkter (rekombinationsaktiver) Kontakt zwischen Silizium-Absorber und Metallisierung vor.

Aber auch für diese neuen Konzepte ist für Silizium-Solarzellen das maximale Wirkungsgradpotenzial limitiert auf ein theoretisches Maximum von 29,5% (Intrinsisches Limit) (Veith-Wolf et al. 2018). Es stellt sich somit die Frage: Was kommt danach?

Das Sonnenspektrum kann bisher von Silizium-Solarzellen nicht voll ausgenutzt werden, somit limitieren Thermalisierungs- und Transmissionsverluste bisher den Wirkungsgrad.

Abbildung 1
„Lernkurve“ der Wirkungsgradsteigerung in der Solarzellen-Massenfertigung im zeitlichen Verlauf
(Quelle: Fraunhofer ISE)

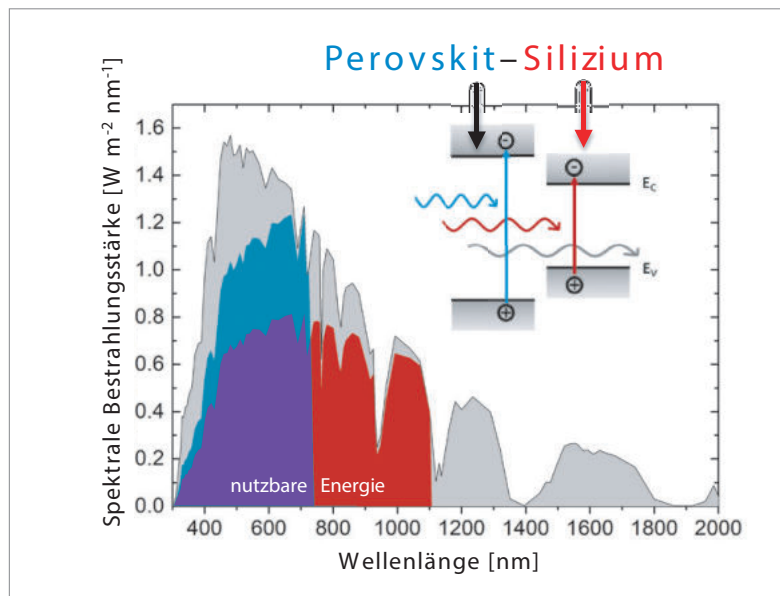


Abbildung 2

Bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums durch eine Silizium-Tandem-Solarzelle

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Doch Silizium-Tandem-Solarzellen, bei denen eine Silizium-Solarzelle mit einer z. B. auf III-V Halbleitermaterialien oder Metallhalogenid-Verbindungen in der Perowskit-Kristallstruktur basierten Solarzelle als Stapel verbunden werden, ermöglichen es, diese Limitierungen zu überwinden und somit das Sonnenspektrum effizienter auszunutzen (► *Abbildung 2*).

Alle an diesem Beitrag beteiligten Institute forschen von den Grundlagen für neue Konzepte über Laborzellen und die Skalierung bis zum Transfer in die Produktion. In den nachfolgenden Abschnitten werden die aktuellen Ergebnisse zu Siliziumoxid-Poly-Silizium, Silizium-Heterojunction und Silizium-Tandem-basierten Konzepten vorgestellt.

Siliziumoxid-Poly-Silizium

Siliziumoxid/Poly-Si basierte Solarzellen bieten das Potenzial für sehr hohe Wirkungsgrade. Sowohl Fraunhofer ISE also auch ISFH haben Rekordwirkungsgrade an Laborsolarzellen dieser Technologie demonstriert. Fraunhofer ISE 26% für eine beidseitig kontaktierte Solarzelle (Richter et al. 2021) (► *Abbildung 3*), ISFH 26,1% mit einer Solarzelle basierend auf beidseitig passivierenden Kontakten und nur rückseitiger Kontaktierung (Haase et al. 2018) (► *Abbildung 4*).

Aktuell wird intensiv daran gearbeitet, die industrielle Umsetzung voranzutreiben, indem beispielweise die dotierten Poly-Si Schichten in einem industriellen Rohofen-PECVD-Prozess abgeschieden werden. Wichtig ist hierbei, den Durchsatz zu steigern, aber

auch gleichzeitig eine homogene und hohe Prozessgüte zu erzielen. Die aktuell beste industrielle TOPCon-Zelle am Fraunhofer ISE erzielt bisher einen Wirkungsgrad von 23% auf großer Waferfläche (Feldmann et al. 2020).

Neben der Durchsatzsteigerung wird daran gearbeitet, den Materialverbrauch und somit die Kosten zu reduzieren, indem Silber (Ag) bei der Metallisierung eingespart wird. Fraunhofer ISE arbeitet hierbei an Kupfer (Cu)-Plating als Alternative zu Siebdruck mit Ag-basierten Pasten und konnte für beide Ansätze einen vergleichbaren Wirkungsgrad demonstrieren (Steinhauser et al. 2020).

Selektive passivierende Kontakte können in verschiedenen Varianten kombiniert werden (Brendel et al. 2018; Schmidt et al. 2018). Das ISFH verfolgt für industrielle POLO-Solarzellen die Kombination aus Aluminium (Al) p+ als Löcher-selektivem und SiOx/n+ Poly-Si als Elektronen-selektivem Kontakt. Bei diesem Ansatz kann die Prozess-Sequenz verkürzt werden, da ein Hochtemperatur-Schritt entfällt.

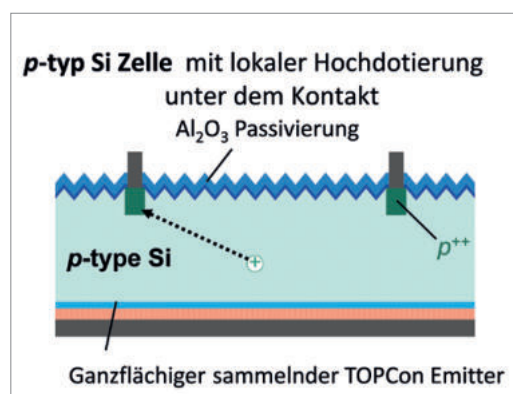
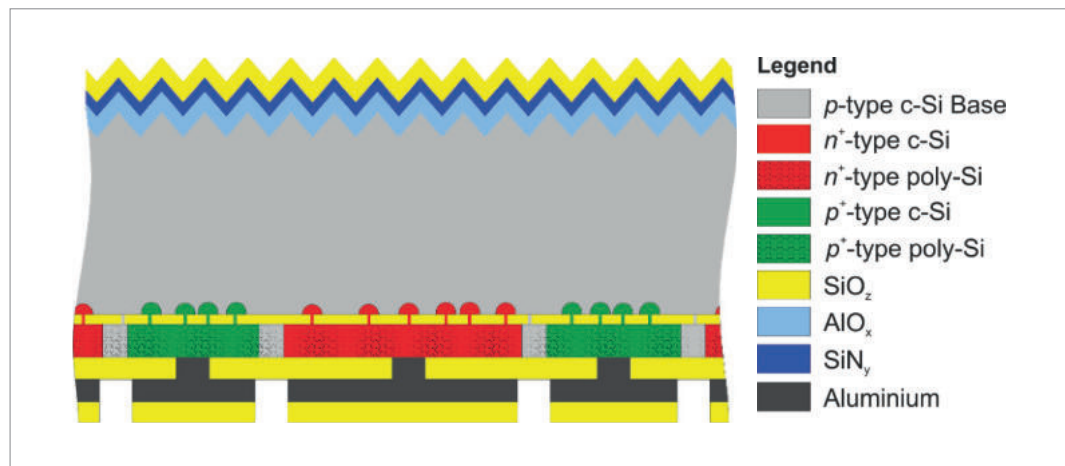


Abbildung 3

Querschnittsskizze der beidseitig kontaktierten TOPCon-Rekordsolarzelle

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Abbildung 4
**Querschnittskizze der
 rückseitig kontaktierten
 POLO-Rekordsolarzelle**
 (Quelle: ISFH)



Zudem kann auch Ag eingespart werden, da eine Polarität ohnehin bereits mit Al metallisiert ist. Auf großer (kleiner) Wafer-Fläche konnte mit dieser Prozessroute bisher ein Wirkungsgrad von 22,6% (23%) erzielt werden (Kruse et al. 2020).

Auch kann Siliziumoxid-nanokristallines (nc) Silizium als transparenter passivierender Kontakt (TPC) angewendet werden, was am FZ Jülich erfolgreich gezeigt werden konnte. Mit diesem Ansatz wird der Vorderseitenkontakt bzgl. Transparenz optimiert und es können Prozess- sowie Hochtemperaturschritte eingespart werden. Mit diesem Ansatz konnte bisher ein Wirkungsgrad von 23,8% für Laborsolarzellen erzielt werden (Kohler et al. 2020).

Silizium-Heterojunction

SHJ-Solarzellen haben ebenfalls ein sehr hohes Wirkungsgradpotenzial, s.o. (Yoshikawa et al. 2017). An der Schnittstelle zwischen Labor und Produktion werden aktuell bereits Effizienzwerte zwischen 24 und 25% auf großer Waferfläche erreicht.

Neben Ansätzen zur weiteren Effizienzsteigerung durch Verbesserungen an den amorphen oder nanokristallinen Silizium (a-Si bzw. nc-Si) und transparenten leitfähigen Oxid (transparent conductive oxide, TCO)-Schichten (wie beispielweise transparentere dotierte a-Si-Schichten oder TCO-Schichten mit hoher Mobilität), werden material- und somit kostensparende Ansätze von FZ Jülich, Fraunhofer ISE und HZB Berlin untersucht.

Ein zentrales Thema ist die Einsparung von Indium (In) für das TCO Indium Zinn Oxid (engl. Indium Tin Oxide, ITO) durch Teil- oder Vollsubstitution durch andere (TCO) Materialien. FZ Jülich und HZB konnten ITO durch Aluminium-Zink-Oxid (AZO) erfolgreich ersetzen und an Laborsolarzellen (ca. 4 cm²) einen Wirkungsgrad von 23,6% (Wu et al. 2021) bzw.

23,65% (Morales-Vilches et al. 2019; Cruz et al. 2020) erzielen. Fraunhofer ISE hat gezeigt, dass durch eine Teilsubstitution der ITO-Schicht durch eine mittels Sprühpyrolyse aufgebrauchte TiO_x Capping-Schicht 72% ITO Material eingespart werden kann bei vergleichbaren Wirkungsgraden (Bartsch et al. 2020).

Silizium-Tandem

Aktuell wird die Forschung zu III-V/Silizium und Perowskit/Silizium-Tandem-Solarzellen stark ausgebaut. Diese Zellkonzepte ermöglichen es, noch höhere Wirkungsgrade zu erzielen. Die aktuell höchste wissenschaftlich publizierte Perowskit/Silizium-Tandem-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 29,52% wurde von Oxford PV hergestellt (Pressemeldung 21.12.2020). Bis dahin lag der Rekordwirkungsgrad bei 29,15% für die am HZB hergestellte Solarzelle (Helmholtz-Zentrum Berlin; Al-Ashouri et al. 2020). In der optimierten Zellstruktur der HZB-Zelle wird anstelle eines Polymers (PTAA) eine Selbst-assemblierende Monolage (SAM, MeO-2PACz) als neuer Kontakt zwischen der SHJ-Bottomzelle und der Perowskit-Schicht verwendet, die zu einer verbesserten Passivierung führt sowie eine konformale und skalierbare Abscheidung ermöglicht. Eine erste Skalierung dieser Technologie mit Siebdruckmetallisierung konnte erfolgreich auf einer Solarzellenfläche von 61,6 cm² mit einem Wirkungsgrad von 21,13% demonstriert werden.

Am Fraunhofer ISE konnte mit einer monolithischen III-V Silizium-Tandem-Solarzelle ebenfalls ein neuer Weltrekordwirkungsgrad mit 34,5% erzielt werden, indem sowohl für die Silizium-Bottom-Zelle wie auch für die III-V-Top-Zelle selektive passivierende Kontakte verwendet wurden (Schygulla et al. 2020 – 2020; Müller et al. 2020).

Fazit

Dieser Beitrag zeigt auf, dass alle aktuellen Rekordzellen auf selektiven/passivierenden Kontakten basieren und diese Solarzellentechnologien die nächste Generation in der Photovoltaik-Produktion und zugleich Basis für neue Konzepte sind. Die Entwicklung von ressourcenschonenden Prozess-Sequenzen ist hochrelevant, um den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien über den Anteil von derzeit ~10% (BP 2019) am globalen Primärenergie-Mix hinaus ökonomisch attraktiv zu machen und auch langfristige ökologische und sozioökonomische Folgen positiv zu beeinflussen. Das FuE-Konsortium leistet einen wichtigen Beitrag, um Entwicklungen der Photovoltaik-Technologien auf allen TRLs voranzutreiben und somit die PV-Produktion weltweit und insbesondere in Europa zu unterstützen.

Literatur

- Al-Ashouri, Amran; Köhnen, Eike; Li, Bor; Magomedov, Artiom; Hempel, Hannes; Caprioglio, Pietro et al. (2020): Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with 29% efficiency by enhanced hole extraction. In: *Science* 370 (6522), S. 1300–1309. <https://doi.org/10.1126/science.abd4016>
- Bartsch, J.; Heitmann, U.; Jakob, L.; Mahmoud Algazzar, R.; Tutsch, L.; Hermann, R. et al. (2020): Spray Pyrolysis – A Versatile Technique for Thin Film Deposition in PV. 4 pages / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 44-47 / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 44–47. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-1AO.3.6>
- Blakers, Andrew (2019): Development of the PERC Solar Cell. In: *IEEE J. Photovoltaics* 9 (3), S. 629–635. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899460>
- BP (2019): *Statistical Review of World Energy*. 68th Edition.
- Brendel, R.; Kruse, C.; Merkle, A.; Schulte-Huxel, H.; Haase, F.; Peibst, R. (2018): Screening Carrier Selective Contact Combinations for Novel Crystalline Si Cell Structures. 8 pages / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 39-46 / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 39–46. <https://doi.org/10.4229/35thEUPVSEC20182018-1AO.2.6>
- Cruz, Alexandros; Ruske, Florian; Eljarrat, Alberto; Michalowski, Pawel P.; Morales-Vilches, Anna B.; Neubert, Sebastian et al. (2020): Influence of Silicon Layers on the Growth of ITO and AZO in Silicon Heterojunction Solar Cells. In: *IEEE J. Photovoltaics* 10 (2), S. 703–709. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2957665>
- Feldmann, F. (2015): Carrier-selective contacts for high-efficiency Si solar cells. Dissertation. Universität Freiburg, Freiburg. Technische Fakultät.
- Feldmann, F.; Bivour, M.; Reichel, C.; Hermle, M.; Glunz, Stefan W. (2013): A passivated rear contact for high-efficiency n-type silicon solar cells enabling high VocS and FF>82%. *Proceedings of the 29th EUPVSEC, Paris, France*. In: 28th EUPVSEC Paris. 2013. *Proceedings*. Paris, S. to be published.
- Feldmann, F.; Steinhauser, B.; Pernau, T.; Nagel, H.; Fellmeth, T.; Mack, S. et al. (2020): Industrial TOPCon Solar Cells Realized by a PECVD Tube Process. 6 pages / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 164–169 / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 164–169. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-2AO.6.3>
- Feldmann, Frank; Bivour, Martin; Reichel, Christian; Steinkemper, Heiko; Hermle, Martin; Glunz, Stefan W. (2014): Tunnel oxide passivated contacts as an alternative to partial rear contacts. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131, S. 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.015>
- Fertig, F.; Lantzsch, R.; Mohr, A.; Schaper, M.; Bartsch, M.; Wissen, D. et al. (2017): Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22%. In: *Energy Procedia* 124, S. 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.308>
- Haase, Felix; Hollemann, Christina; Schäfer, Sören; Merkle, Agnes; Rienäcker, Michael; Krügener, Jan et al. (2018): Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells. In: *Sol Energ Mat Sol C* 186, S. 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.020>
- Helmholtz Zentrum Berlin: World Record: Efficiency of perovskite silicon tandem solar cell jumps to 29.15 per cent. Online verfügbar unter https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=21020;sprache=en;seitenid=72384.
- Hermle, M. (2017): *PV Manufacturing in Europe*. ETIP PV. Brussels, 2017.

- Kohler, Malte; Pomaska, Manuel; Zamchiy, Alexandr; Lambertz, Andreas; Duan, Weiyuan; Lentz, Florian et al. (2020): Optimization of Transparent Passivating Contact for Crystalline Silicon Solar Cells. In: IEEE J. Photovoltaics 10 (1), S. 46–53. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2947131>
- Kruse, Christian; Peibst, Robby; Schäfer, Sören; Mertens, Verena; Bordihn, Stefan; Dullweber, Thorsten et al. (2020): For none, one, or two polarities—How do POLO junctions fit best into industrial Si solar cells? In: Prog Photovoltaics 28 (6), S. 503–516. <https://doi.org/10.1002/pip.3201>
- Morales-Vilches, Anna B.; Cruz, Alexandros; Pingel, Sebastian; Neubert, Sebastian; Mazzarella, Luana; Meza, Daniel et al. (2019): ITO-Free Silicon Heterojunction Solar Cells With ZnO:Al/SiO₂ Front Electrodes Reaching a Conversion Efficiency of 23%. In: IEEE J. Photovoltaics 9 (1), S. 34–39. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2873307>
- Müller, R.; Schygulla, P.; Lackner, D.; Höhn, O.; Hauser, H.; Richter, A. et al. (2020): Silicon-Based Monolithic Triple-Junction Solar Cells with Conversion Efficiency >34%. 5 pages / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 574-578 / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 574-578. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-3AO.7.2>
- Peibst, R.; Romer, U.; Hofmann, K. R.; Lim, B.; Wietler, T. F.; Krugener, J. et al. (2014): A simple model describing the symmetric I–V characteristics of p polycrystalline Si/n monocrystalline Si, and n polycrystalline Si/p monocrystalline Si junctions. In: IEEE J. Photovoltaics 4 (3), S. 841–850. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2310740>
- Richter, A.; Müller, R.; Benick, J.; Feldmann, F.; Steinhauser, B.; Reichel, C. et al. (2021): Design rules for high-efficiency both-sides-contacted silicon solar cell with balanced charge carrier transport and recombination losses. accepted for publication. In: Nature Energy.
- Römer, U.; Peibst, R.; Ohrdes, T.; Lim, B.; Krügener, J.; Bugiel, E. et al. (2014): Recombination behavior and contact resistance of n+ and p+ poly-crystalline Si/mono-crystalline Si junctions. In: Solar Energy Materials and Solar Cells 131, S. 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.003>
- Schmidt, Jan; Peibst, Robby; Brendel, Rolf (2018): Surface passivation of crystalline silicon solar cells: Present and future. In: Sol Energy Mat Sol C 187, S. 39–54. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.047>
- Schygulla, Patrick; Heinz, Friedemann; Lackner, David; Dimroth, Frank (2020 - 2020): Subcell Development for Wafer-Bonded III-V//Si Tandem Solar Cells. In: 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). 2020 IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Calgary, OR, 15.06.2020 – 21.08.2020: IEEE, S. 2716–2719.
- Steinhauser, B.; Grübel, B.; Nold, S.; Arya, V.; Schmiga, C.; Kluska, S. et al. (2020): Plating on TOPCon as a Way to Reduce the Fabrication Costs of i-TOPCon Solar Cells. 5 pages / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 179-183 / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 179-183. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-2BO.1.1>
- VDMA (2020): International Technology Roadmap for Photovoltaic ITRPV. Online verfügbar unter <https://itrpv.vdma.org/>
- Veith-Wolf, Boris A.; Schäfer, Sören; Brendel, Rolf; Schmidt, Jan (2018): Reassessment of intrinsic lifetime limit in n-type crystalline silicon and implication on maximum solar cell efficiency. In: Sol Energy Mat Sol C 186, S. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.029>
- Wu, Zhuopeng; Duan, Weiyuan; Lambertz, Andreas; Qiu, Depeng; Pomaska, Manuel; Yao, Zhirong et al. (2021): Low-resistivity p-type a-Si:H/AZO hole contact in high-efficiency silicon heterojunction solar cells. In: Appl Surf Sci 542, S. 148749. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148749>
- Yoshikawa, Kunta; Yoshida, Wataru; Irie, Toru; Kawasaki, Hayato; Konishi, Katsunori; Ishibashi, Hirotaka et al. (2017): Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology. In: Sol Energy Mat Sol C 173, S. 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.024>
- Zhang, X.; Liu, W.; Chen, Y.; Chen, S.; Xu, G.; Hu, Y. Y. et al. (2020): A Roadmap towards 24%-Efficiency PERC Cells Based on Screen Printing for Mass Production. 5 pages / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 233-237 / 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 233-237. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-2CO.13.1>