

Halbleitertechnologie von A bis Z

Optoelektronik & Photonik

Solarzellen	3
Photovoltaischer Effekt: Grundprinzip	3
Innerer Aufbau einer Si-Solarzelle	3
Kennlinie und Kenngrößen	5
Verlustmechanismen	6
Materialsysteme und Zelltypen	7

Solarzellen

Photovoltaischer Effekt: Grundprinzip

Die Solarzelle nutzt denselben physikalischen Grundmechanismus wie die in Kapitel 4 behandelte Photodiode – Absorption eines Photons erzeugt ein Elektron-Loch-Paar, das im elektrischen Feld der Raumladungszone eines pn-Übergangs getrennt wird –, verfolgt damit aber ein grundlegend anderes Ziel. Während die Photodiode als Detektor optimiert ist und typischerweise in Sperrrichtung betrieben wird, um eine breite, feldstarke Raumladungszone für hohe Geschwindigkeit und Empfindlichkeit zu erzeugen, arbeitet die Solarzelle ohne externe Vorspannung: Sie soll selbst elektrische Leistung erzeugen, nicht nur ein Signal registrieren. Die Diode wird hier als Generator betrieben, nicht als Verbraucher – ein Betriebszustand, den man im Diodenkennlinienfeld als vierten Quadranten bezeichnet, in dem Strom und Spannung entgegengesetzte Vorzeichen relativ zur üblichen Diodenkonvention haben.

Zwei Grenzfälle beschreiben das Verhalten der beleuchteten Zelle. Wird die Zelle kurzgeschlossen (Klemmenspannung $U = 0$), fließt der Kurzschlussstrom I_{sc} – praktisch der gesamte durch Photonen erzeugte Strom, da kein Gegenfeld die Ladungsträger am Verlassen der Zelle hindert. Wird die Zelle dagegen im Leerlauf betrieben (kein Stromfluss, offene Klemmen), baut sich die Leerlaufspannung U_{oc} auf: Die photogenerierten Ladungsträger sammeln sich an den Kontakten, bis das dadurch entstehende Gegenfeld den photoinduzierten Diffusionsstrom exakt kompensiert. Zwischen diesen beiden Extremen – Kurzschluss und Leerlauf – liegt der gesamte nutzbare Arbeitsbereich der Zelle, in dem tatsächlich elektrische Leistung $P = I \cdot U$ an einen externen Verbraucher abgegeben wird.

Anders als bei der Photodiode ist bei der Solarzelle die aktive Fläche maximiert statt minimiert: Photodioden sind oft klein und schnell, Solarzellen dagegen groß (typisch 15×15 cm oder größer bei Si-Wafern) und auf maximale Lichtsammlung optimiert. Diese Flächenoptimierung bringt eigene Herausforderungen mit sich – insbesondere den lateralen Serienwiderstand beim Abtransport des erzeugten Stroms zu den Kontakten, ein Thema, das im Absatz zum inneren Aufbau vertieft wird.

Innerer Aufbau einer Si-Solarzelle

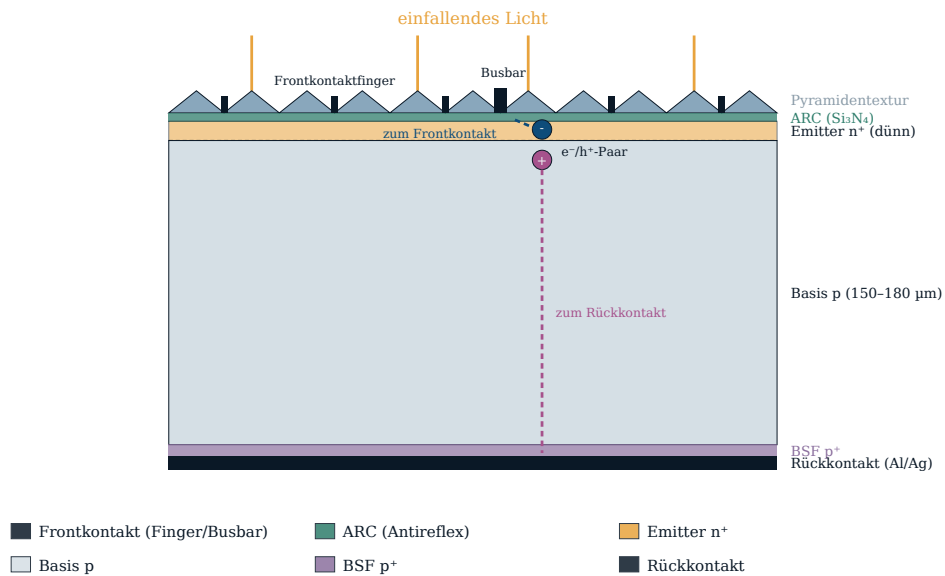
Die klassische kristalline Silicium-Solarzelle besteht aus einer schwach p-dotierten Basis (typisch Bor-dotiert, Wafer-Dicke 150–180 μm), in die von der Vorderseite eine stark n-dotierte Emitterschicht eindiffundiert wird (meist

Phosphor, Diffusionstiefe nur 0,3–0,5 μm). Dieser flache, stark asymmetrische pn-Übergang – Emitter deutlich dünner und höher dotiert als die Basis – ist so ausgelegt, dass möglichst viele Photonen bereits in oder nahe der Raumladungszone absorbiert werden, wo die Ladungsträgertrennung am effizientesten ist, während die dicke Basis den Großteil des Lichts über einen weiten Spektralbereich hinweg absorbiert.

Die Vorderseite trägt ein Kontaktgitter aus feinen Metallfingern (meist siebgedrucktes Silberpaste, Fingerbreite oft unter 100 μm) plus zwei bis drei breiteren Sammelschienen (Busbars), die den lateral in der dünnen Emitterschicht fließenden Strom einsammeln. Dieses Gitter steht dabei in einem grundlegenden Zielkonflikt: Ein dichteres, breiteres Fingermuster reduziert den Serienwiderstand des Emitters, verschattet aber gleichzeitig mehr aktive Fläche und blockiert damit einfallendes Licht – das optimale Fingerdesign balanciert elektrische und optische Verluste gegeneinander aus. Die Rückseite trägt dagegen meist eine vollflächige Aluminium- oder Silbermetallisierung, die zugleich als Rückkontakt und als Reflektor für nicht absorbiertes Licht dient.

Zwei weitere Strukturmerkmale erhöhen die Effizienz gezielt. Die Antireflexbeschichtung (ARC, meist Siliciumnitrid Si_3N_4 , Dicke im Bereich der Viertelwellenlänge des relevanten Spektralbereichs) reduziert die Reflexionsverluste an der Frontfläche durch destruktive Interferenz des reflektierten Lichts – unbeschichtetes Silicium reflektiert wegen seines hohen Brechungsindex ($n \approx 3,5$) sonst über 30 % des einfallenden Lichts, mit ARC lässt sich das auf wenige Prozent senken. Zusätzlich wird die Oberfläche häufig texturiert (bei monokristallinem Silicium meist pyramidenförmig durch anisotropes alkalisches Ätzen entlang der (111)-Kristallebenen), sodass Licht, das an einer Pyramidenflanke reflektiert wird, auf eine benachbarte Flanke trifft und dort eine zweite Absorptionschance erhält, statt vollständig verloren zu gehen. An der Rückseite sorgt ein Back Surface Field (BSF) – eine zusätzliche, stärker dotierte p^+ -Schicht direkt unter dem Rückkontakt – für ein internes Feld, das Minoritätsladungsträger von der stark rekombinationsaktiven Metallgrenzfläche fernhält und so die effektive Sammlung erhöht.

Innerer Aufbau einer kristallinen Si-Solarzelle Vom einfallenden Licht bis zur Ladungstrennung im pn-Übergang



Nur nahe der dünnen Emitterschicht getrennte Ladungsträger werden effizient gesammelt – Textur und ARC maximieren dafür zunächst die Lichtausbeute.

Kennlinie und Kenngrößen

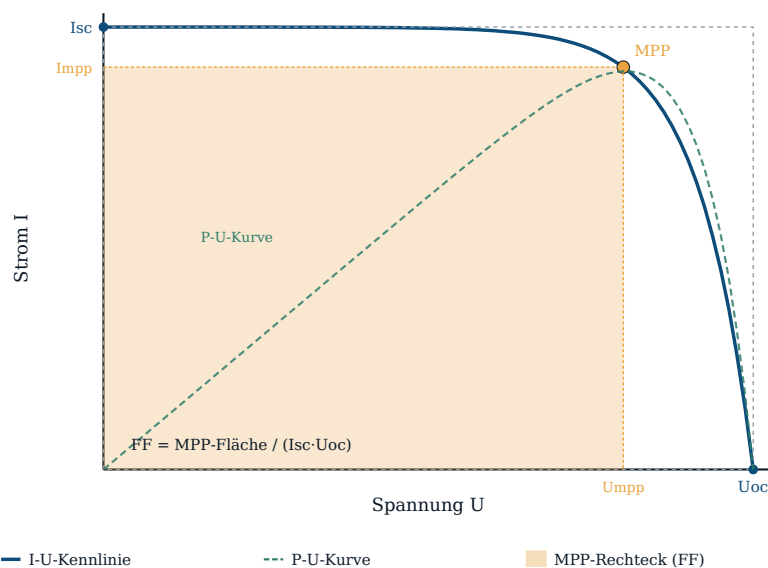
Das elektrische Verhalten einer Solarzelle lässt sich im einfachsten Fall durch das Ein-Dioden-Ersatzschaltbild beschreiben: eine ideale Diode, parallel dazu eine Stromquelle für den photogenerierten Strom I_{ph} , ergänzt um einen Serienwiderstand R_s (Kontaktwiderstände, Emitter- und Basiswiderstand, Metallisierung) und einen Parallelwiderstand R_p (Leckströme über Kristalldefekte oder Zellrandbereiche). Die resultierende Strom-Spannungskennlinie unter Beleuchtung verläuft von I_{sc} bei $U = 0$ zu U_{oc} bei $I = 0$, mit einem charakteristischen "Knie" dazwischen – die genaue Form dieses Knies bestimmt maßgeblich die nutzbare Leistung.

Auf dieser Kennlinie liegt der Punkt maximaler Leistungsabgabe, der Maximum Power Point (MPP), bei den Werten I_{mpp} und U_{mpp} mit $P_{mpp} = I_{mpp} \cdot U_{mpp}$. Das Verhältnis dieser maximalen Leistung zum theoretisch größtmöglichen Rechteck aus I_{sc} und U_{oc} wird als Füllfaktor $FF = P_{mpp} / (I_{sc} \cdot U_{oc})$ bezeichnet – ein Maß dafür, wie "eckig" die Kennlinie verläuft. Hochwertige monokristalline Si-Zellen erreichen Füllfaktoren von 0,80–0,83; Serienwiderstandsverluste runden das Knie ab und senken den Füllfaktor, während ein zu niedriger Parallelwiderstand vor allem die Kennlinie im Bereich niedriger Spannung verzerrt. Der Wirkungsgrad $\eta = P_{mpp} / P_{licht}$ setzt die maximale elektrische Ausgangsleistung ins Verhältnis zur eingestrahlten optischen Leistung (bei Standardtestbedingungen

1000 W/m², AM1.5-Spektrum) und ist die zentrale Vergleichsgröße zwischen Zelltechnologien.

Da MPP-Spannung und -Strom von Bestrahlungsstärke und Temperatur abhängen und sich im Tagesverlauf ständig verschieben, arbeiten reale Photovoltaikanlagen nie bei einem festen Arbeitspunkt, sondern nutzen einen MPP-Tracker (MPPT) im Wechselrichter, der die Kennlinie kontinuierlich abtastet und den Lastwiderstand elektronisch so nachführt, dass die Zelle stets nahe ihrem aktuellen Leistungsmaximum betrieben wird.

I-U-Kennlinie und Maximum Power Point
Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Füllfaktor einer beleuchteten Solarzelle



Der Füllfaktor FF beschreibt, wie nahe die Kennlinie an das theoretische Rechteck aus I_{sc} und U_{oc} herankommt – je eckiger, desto höher FF.

Verlustmechanismen

Selbst eine ideale Silicium-Solarzelle kann nicht die gesamte eingestrahlte Sonnenenergie in elektrische Leistung umwandeln – das Shockley-Queisser-Limit von 1961 setzt für eine Einfachübergangs-Solarzelle mit gegebener Bandlücke eine theoretische Wirkungsgradobergrenze, für Silicium ($E_g \approx 1,12$ eV) bei rund 33 %. Zwei fundamentale, materialbedingte Verluste verursachen diese Grenze. Thermalisierungsverluste entstehen, weil Photonen mit einer Energie oberhalb der Bandlücke ihre überschüssige Energie sofort als Wärme (Phononen) abgeben, sobald das angeregte Elektron auf die Leitungsbandkante relaxiert – bei Silicium betrifft das einen erheblichen Teil des Sonnenspektrums,

da viele Photonen deutlich energiereicher sind als die 1,12 eV der Bandlücke. Transmissionsverluste entstehen umgekehrt durch Photonen unterhalb der Bandlückenenergie, die den Halbleiter ungenutzt durchqueren, weil ihre Energie für eine Anregung schlicht nicht ausreicht.

Neben diesen unvermeidbaren materialbedingten Grenzen gibt es eine Reihe technologischer Verlustmechanismen, die sich durch besseres Zelldesign reduzieren, aber nie vollständig eliminieren lassen. Optische Verluste umfassen die bereits angesprochene Restreflexion trotz ARC, die Abschattung durch das Frontkontaktgitter (typisch 3–5 % der Zellfläche) sowie unvollständige Lichteinfangeffekte trotz Textur. Rekombinationsverluste – strahlend, über Störstellen (Shockley-Read-Hall) oder Auger, wie bereits im LED-Kapitel diskutiert, allerdings hier als unerwünschter statt erwünschter Effekt – reduzieren die Zahl der tatsächlich an den Kontakten gesammelten Ladungsträger, insbesondere an der Oberfläche und an Kristalldefekten. Resistive Verluste schließlich entstehen an Serienwiderständen (Emitterschicht, Metallisierung, Kontaktübergänge) und werden mit steigender Stromdichte quadratisch relevanter ($P_{\text{verlust}} = I^2 \cdot R_s$), was besonders bei Zellen unter konzentriertem Sonnenlicht zum limitierenden Faktor wird.

Materialsysteme und Zelltypen

Kristallines Silicium dominiert den globalen Photovoltaikmarkt mit einem Anteil von deutlich über 90 %, unterteilt vor allem in monokristalline Zellen (aus einem einzigen Siliciumkristall gezogen, meist per Czochralski-Verfahren, homogenere Kristallstruktur, aktuell Wirkungsgrade um 22–24 % in der Serienproduktion) und multikristalline Zellen (aus mehreren Kristallkörnern gegossen, günstiger in der Herstellung, aber durch Korngrenzen als zusätzliche Rekombinationszentren etwas geringere Wirkungsgrade). Die Materialbasis ist damit dieselbe wie bei den meisten in der Mikroelektronik verwendeten Wafern, allerdings mit deutlich geringeren Anforderungen an die Kristallreinheit als bei integrierten Schaltkreisen – ein Kostenvorteil, der Silicium-Photovoltaik erst großflächig wirtschaftlich gemacht hat.

Dünnschichttechnologien verfolgen einen grundlegend anderen Ansatz: Statt dicker Wafer wird nur eine wenige Mikrometer dünne Absorberschicht auf einem günstigen Trägersubstrat (Glas, Metallfolie) abgeschieden – möglich, weil Materialien wie CdTe (Cadmiumtellurid) oder CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid) eine direkte Bandlücke besitzen und dadurch, ganz analog zur in Kapitel 1 behandelten LED-Materialwahl, Licht auf viel kürzerer Absorptionslänge einfangen als das indirekte Silicium. Das spart Material und ermöglicht potenziell günstigere Fertigung, bei aktuell etwas geringeren Wirkungsgraden als kristallines Silicium.

Für Anwendungen, bei denen Wirkungsgrad wichtiger ist als Kosten pro Fläche – etwa Satelliten oder konzentrierende Photovoltaiksysteme – kommen III-V-Mehrfachsolarzellen zum Einsatz, die direkt an die im Bereich Verbindungshalbleiter behandelten Materialsysteme anknüpfen: Mehrere pn-Übergänge unterschiedlicher Bandlücke (etwa GaInP, GaAs, Germanium) werden monolithisch übereinander gewachsen, sodass jede Teilzelle bevorzugt den für sie energetisch passenden Spektralbereich absorbiert und die übrigen Photonen an die nächste Teilzelle durchlässt – dieses Konzept umgeht die Shockley-Queisser-Grenze einer Einzelzelle und erreicht im Labor Wirkungsgrade von über 45 %. Als vielversprechende, aber noch nicht langzeitstabile Ergänzung gelten Perowskit-Solarzellen, deren lösungsbasierte, potenziell sehr kostengünstige Herstellung aktuell intensiv erforscht wird, unter anderem in Tandem-Konfiguration mit klassischem Silicium.