

Photovoltaik: Analyse von Zellbruch

Dieser Beitrag beschreibt die Vorgehensweise bei der ANSYS-basierten Analyse des Ermüdungsverhaltens von Kupferbändchen, die zur Serienverschaltung von Solarzellen in Photovoltaik-Modulen verwendet werden.

Die Entwicklung der Photovoltaik ist derzeit von der Reduzierung des Kosten-/Leistungs-Verhältnisses für Solarenergimodule geprägt. Ziel ist eine schnelle Kostenparität mit konventionellen Formen der

fernbändchen-Modulmontage. Diese Methode wird für multikristalline als auch monokristalline 170 μm – 200 μm dicke Silizium-Wafer verwendet. Während des Siebdruckschrittes werden metallhaltige

Die erste Belastungsphase für die Kupferbändchen und Solarzellen ist der Laminierprozess. Dieser Prozess ist der letzte Schritt zur Herstellung eines Photovoltaik-Moduls. Hierbei wird ein Schichtaufbau aus

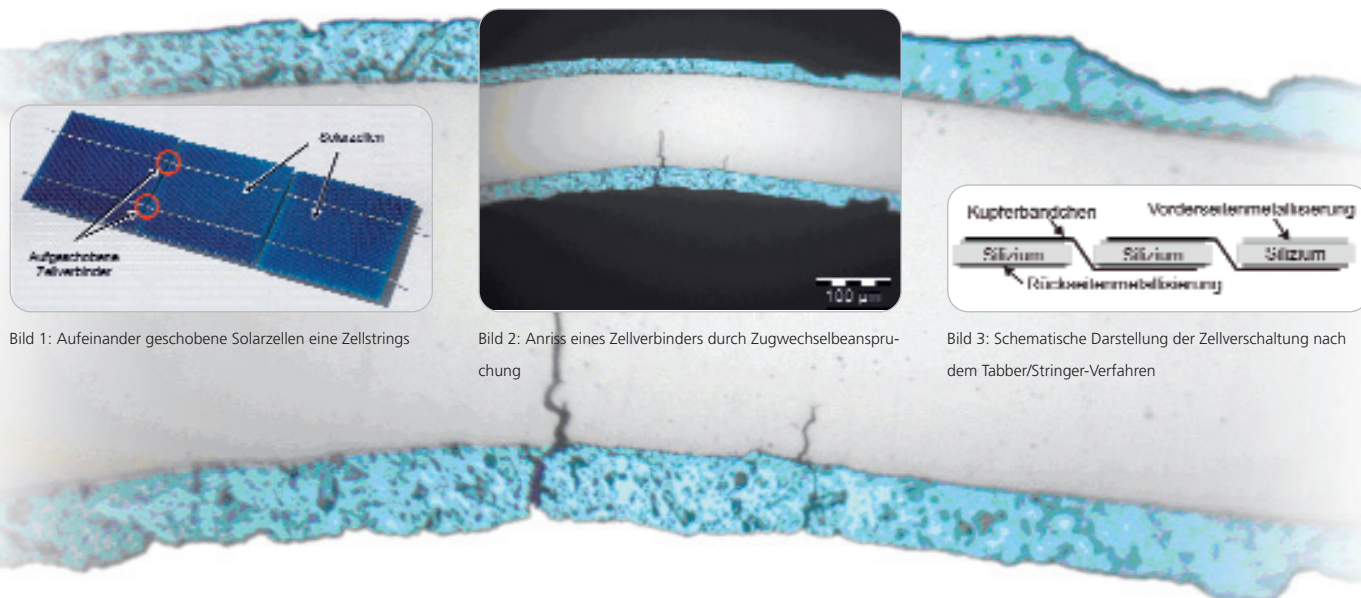


Bild 1: Aufeinander geschobene Solarzellen eine Zellstrings

Bild 2: Anriss eines Zellverbinders durch Zugwechselbeanspruchung

Bild 3: Schematische Darstellung der Zellverschaltung nach dem Tabber/Stringer-Verfahren

Energieerzeugung. Aufgrund des Marktanteils von über 90%, ist die Entwicklung der Photovoltaik vor allem von Verbesserungen in der kristallinen Silizium-Solarzellen-Technologie abhängig. Durch Verringerung der Silizium-Waferdicke wird eine Steigerung des Zellwirkungsgrades bei reduziertem Materialverbrauch erreicht und damit das Kosten-/Leistungs-Verhältnis verbessert. Da mono- und multikristalline Wafer verwendet werden, ergeben sich vielfältige Schwierigkeiten bezüglich der Bruchfestigkeit während der Zellproduktion. Dies ist auf die große Schwankungsbreite der mechanischen Eigenschaften des multikristallinen Siliziums zurückzuführen.

Ein weiteres Problem der reduzierten Waferdicke ist die Zuverlässigkeit der Solarzellenverbinder (Bilder 1 und 2). Die industriell am weitesten verbreitete elektrische Verbindungstechnik ist die Siebdruck-Kup-

Pasten (Al, Ag) auf die Wafer-Oberflächen gedruckt und gebrannt, wodurch elektrische Anschlusskontakte und ein sogenanntes Rückseitenfeld auf der Zelle erzeugt werden. Es existiert ein räumlich getrennter Emitter- und Basiskontakt auf der Vorder- bzw. Rückseite des Wafers. Die Verschaltung der einzelnen Zellen erfolgt nach dem Tabber/Stringer-Verfahren (Bild 3). Hierbei wird der Front- und Rückkontakt zweier benachbarter Zellen mit zwei verzinneten Kupferstreifen verlötet. Diese Kupferbändchen stellen neben der elektrischen die einzige mechanische Verbindung der teilweise aus bis zu 18 Zellen bestehenden Zellenstrings dar. Dabei zeigt sich, dass die geforderte Lebensdauer eines Solarmoduls von 20 – 30 Jahren besonders von den Ermüdungsbelastungen der Kupferbändchen während nachfolgender Herstellungsschritte und den Betriebsbeanspruchungen abhängt.

Frontglas, Ethylvinylacetat (EVA), den Zellstrings und Tedlar bei ca. 140 °C miteinander verpresst. Das weiche EVA-Material bettet die Zellen ein und soll diese vor extremen mechanischen Belastungen schützen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten (CTE) der in diesem Schichtverbund eingesetzten Materialien werden jedoch trotzdem die Lebensdauer reduzierende Beanspruchungen innerhalb des Zellstrings erzeugt. Deshalb soll an dieser Stelle ein solcher Abkühlvorgang nach dem Laminierprozess simuliert und der Einfluss der verringerten Solarzellendicke auf die mechanische Belastung der Kupferbändchen und der Zellen selbst untersucht werden.

Die Abmessungen der für die Belastung der Kupferbändchen und Solarzellen maßgeblich beteiligten Strukturen weisen ein sehr ungünstiges Aspektverhältnis auf. Typi-

sche Solarmodule für die Dachmontage weisen eine Grundfläche von 1,5 m² auf. Die Schichtdicken der auf den Wafer-Oberflächen eingebrannten Metallpasten betragen dagegen nur ca. 50 µm. Die FEM Beanspruchungsanalyse wird daher mit Hilfe der in ANSYS implementierten Submodeling-Technik durchgeführt. Mit Hilfe eines 3D-Globalmodells (Bild 4) werden die temperaturabhängigen Verschiebungen eines vollständigen Modulstreifens berechnet und als Randbedingungen für das Submodell zur Verfügung gestellt. Aufgrund des symmetrischen Modellverhaltens wird

Zelldicke simuliert. Bild 5 zeigt den Verlauf der maximalen temperaturabhängigen Modulbiegung. Während negative Werte eine Wölbung zur Rückseite des Moduls repräsentieren, stehen positive Werte für eine Biegung zur Sonnenseite des Modulstreifens. Man sieht, dass die Waferdicke oberhalb ca. 70 °C einen geringen Einfluss hat. Bei niedrigeren Temperaturen wird ein deutlicher Einfluss der Siliziumdicke sichtbar und die Biegerichtung des Strings wechselt. Das dargestellte Verhalten wird in besonderem Maße von den temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften

dung zwischen zwei benachbarten Viertelzellen. Aufgrund der günstigeren Abmessungen können die Zellkontaktschichten und die Wafer durch getrennte Structural Solids repräsentiert werden. Das zwischen den Zellen gebogene Kupferbändchen wird ebenfalls detailliert wiedergegeben. Die Ergebnisse des Submodells zeigen, dass die plastische Verformung der Kupferbändchen mit fallender Siliziumdicke abnimmt. Ausgehend von den 300 µm dicken Wafern verringert sich die plastische Kupferdehnung auf 78%, 68% sowie 55% bei 200 µm, 170 µm und 140 µm dickem Silizium. Die resultierende Kupferdehnung wird offenbar durch die erzeugte Modulbiegung bestimmt. Einen gegensätzlichen Trend zeigen die während der Abkühlung hervorgerufenen mechanischen Spannungen im Silizium. Im Vergleich zum 300 µm dicken Wafer treten bei den 200 µm, 170 µm und 140 µm Wafern um 123%, 132% bzw. 143% höhere 1. Hauptspannungen auf. Dieses Verhalten wird von der lokalen Zellbiegung dominiert, welches durch die Kombination aus Silizium, den Kontaktschichten und den aufgelöteten Kupferbändchen hervorgerufen wird.

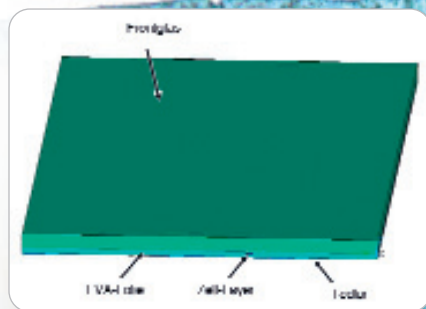


Bild 4: Globalmodell des laminierten Modulstreifens

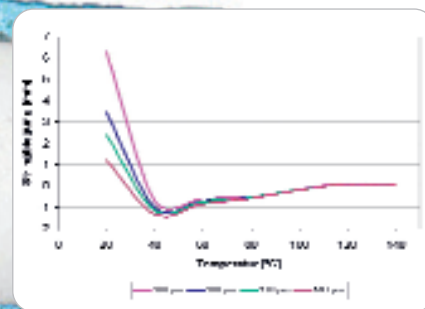


Bild 5: Temperaturabhängige Biegung der Modulstreifen während der Abkühlphase

die Simulation auf ein Viertel des Modulstreifens reduziert. Innerhalb dieses Globalmodells werden ANSYS-Mehrlagenelemente verwendet, mit denen der geringe Querschnitt aus den Vorder- und Rückseitenmetallisierungen sowie dem Wafer selbst, zur Erzeugung gleichmäßiger Elementdicken, zusammengefasst wird. Die Berücksichtigung der dünnen Vorder- und Rückseitenkontakte ist erforderlich, weil sich bei Temperaturänderung nicht nur das Modullaminat verbiegt, sondern auch die Zellen in sich. Hierdurch werden zusätzliche Spannungen in den Kupferbändchen sowie dem Silizium generiert.

des Einbettungsmaterials (EVA) bestimmt. Im oberen Temperaturbereich ist das EVA so weich, dass der Zellstring und das Glas, welche die höchsten E-Moduli aufweisen, voneinander getrennt schrumpfen können. Das Glas arbeitet lediglich gegen das EVA, wodurch geringe Biegungen zur Modulrückseite entstehen. Im Bereich der Raumtemperatur steigt der E-Modul des EVA aufgrund des Erreichens der Glasübergangstemperatur, stark an und der Zellstring wird mechanisch an das Glas gekoppelt. Da Glas ca. einen doppelt so hohen CTE wie Silizium aufweist, biegt sich der Modulstreifen zur Sonnenseite. Die hier

diskutierten Ergebnisse werden nun für das Submodeling verwendet. Das in Bild 6 dargestellte Submodell repräsentiert eine in EVA eingebettete Zellverbin-

Das Erreichen der Kostenparität von Solarmodulen birgt also ein erhöhtes Risiko des Zellbruchs. Die Belastung der Zellverbinder wird durch die schrumpfende Waferdicke jedoch geringer. Die Solarindustrie wird verschiedene Prozess- und Materialoptimierungen einführen müssen, um auch in Zukunft die lange Funktionssicherheit von Solarmodulen zu gewährleisten. <<

Die globalen Modulbiegungen wurden für 4 Siliziumdicken simuliert. Neben den heute gängigen Waferdicken von 170 µm bzw. 200 µm wurde das Stringverhalten auch für eine zukünftige 140 µm und eine frühere 300 µm

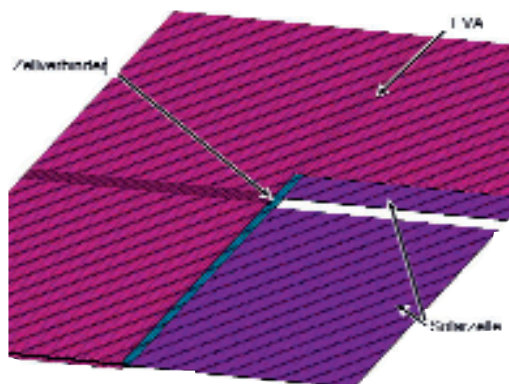


Bild 6: Submodell eines Zellverbinders und zweier benachbarter Zellen

Das in Bild 6 dargestellte Submodell repräsentiert eine in EVA eingebettete Zellverbin-

Das in Bild 6 dargestellte Submodell repräsentiert eine in EVA eingebettete Zellverbin-

Autoren

Frank Krämer, Steffen Wiese, Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik (CSP), Halle E-Mail frank.kraemer@csp.fraunhofer.de

Bilder

Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik (CSP), Halle www.csp.fraunhofer.de

Information

Ansprechpartner ANSYS Multiphysik
Udo Killat, CADFEM GmbH
Tel. +49 (0) 80 92-70 05-0
E-Mail ukillat@cadfem.de