

Rationelles Trennen von Solarzellen: Beurteilung von Strahltechnologien zum Konturschneiden von Silizium

Autoren:

Dipl.-Ing. Jürgen Heikenwälder,

ITW e.V. Chemnitz, Institut für innovative Technologien,
Neefestraße 80 a, D-09119 Chemnitz

Dipl.-Ing. Reiner Matthees,

SOLARWATT Solar-Systeme GmbH, Grenzstraße 28, D-
01109 Dresden

Dr.-Ing. Bernold Richerzhagen,

SYNOVA S.A., Parc Scientifique EPFL, CH-1015 Lausanne

Dipl.-Ing. Thomas Seim,

ITW e.V. Chemnitz, Institut für innovative Technologien,
Neefestraße 80 a, D-09119 Chemnitz

Inhalt:

Ein Dresdner Solarmodulhersteller hat zusammen mit einer FuE-Einrichtung das Laser- und das Wasserstrahlschneiden zum Konturschneiden von Silizium untersucht. Die Ergebnisse und ein noch wenig bekanntes Verfahren mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten werden vorgestellt.

Englisch:

Effective Cutting of Solar Cells:

Evaluation of beam technologies for contour cutting of silicon

A provider of solar modules in co-operation with a R&D Institute investigated the application of laser beam and water jet cutting of contours in silicon. The result and the many of applications of a till now not so well established method will introduced.

Zielstellung

Solarzellen dienen zur direkten Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie. Der Umwandlungsvorgang beruht auf dem Photoeffekt. Die abgreifbare Spannung pro Zelle ist abhängig vom verwendeten Halbleitermaterial und beträgt für Silizium ca. 0,5 V /1/.

Um höhere Spannungen zu erzeugen, ist die Serienschaltung von Einzelzellen erforderlich. Bei begrenzter Modulfläche bedeutet das fast immer, die handelsüblichen kristallinen Solarzellen vom Format 100 mm x 100 mm in kleinflächigere Einzelzellen aufzuteilen und elektrisch wieder miteinander zu verbinden.

Stand der Technik für das Teilen der Solarzellen ist das Anritzen mit einer V-förmigen Schleifscheibe und das anschließende manuelle Brechen. So können nur gerade Konturlinien ausgeführt werden. Eine höhere Produktivität und Ausbringung wären zudem wünschenswert.

Für anwendungsspezifische Solarmodule besteht des weiteren ein Bedarf an Sonderformen konturgeschnittener Zellen bis hin zu Einzelexemplaren. Dies kann zur Anpassung an vorgegebene Platzverhältnisse, zum Erreichen besonderer Effekte, aber auch zum einfacheren Befestigen der Module notwendig sein.

Daraus leitet sich die Aufgabe ab, leistungsfähige Trennverfahren für Solarzellen zu finden und anzupassen, die gerade Schnitte und beliebige Schnittkonturen kostengünstig und präzise ermöglichen. Der Werkstoff Silizium, seine Kristallstruktur und insbesondere die Schichtaktivierung bewirken Restriktionen, die eine Auswahl geeigneter Verfahren erschweren. Dabei ist für die Wahl des Trennverfahrens weniger von Belang, ob als Ausgangsmaterial monokristalline oder polykristalline Wafer oder als Oktagon gezogene Siliziumröhren verwendet werden.

Konturschneiden mit dem Laserstrahl

Das formflexible Laserstrahlschneiden ist in der Blechbearbeitung seit Jahren eingeführt und weit verbreitet. Mit einem fokussierten Laserstrahl wird Material geschmolzen und durch einen Gasstrom aus der Schnittfuge getrieben. Ein Teil des Materials verdampft. Probeschnitte in monokristalline Solarzellen zeigen Schmelzrückstände an den Schnittflächen (Bild 1). Für die Versuche kamen ein gepulster CO₂-Laser und ein Nd:YAG-Laser zum Einsatz.

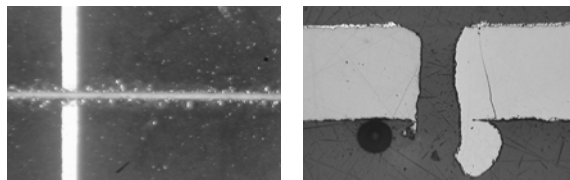


Bild 1 Laserstrahlschneiden: Schnittfuge mit Schmelzperlen (links) Schliffbild einer Schnittfuge (rechts)

Offensichtlich finden Umschmelzvorgänge an den Schnittflächen statt, die zu Spannungsrissen in der Randschicht führten. Außerdem schmolzen beim Durchtrennen der aufgetragenen Leiterbahnen Metallteile ab. Durch diese örtlich verursachten Kurzschlüsse des p-n-Überganges wurden Zonen der Solarzellen photoelektrisch wirkungslos. Die Auswertung elektrischer Kennwerte ergab eine durch das Laserschneiden verursachte Verringerung der elektrischen Leistung der Solarzellen um durchschnittlich 20%. Zur Messung des Wirkungsgradverlaufes über die Zellfläche hinweg wurde ein an der TU Bergakademie Freiberg entwickeltes Meßverfahren genutzt. Es ermöglichte, Kurzschlußstrom- und Reflexions-Topogramme mit einer Flächenauflösung von 0,25 x 0,25 mm aufzunehmen.

Trennverfahren ohne Wärmeeintrag: Wasserstrahlschneiden

Das Wasserstrahlschneiden beansprucht den zu bearbeitenden Werkstoff zwar nicht thermisch. Im Falle des Siliziumschneidens ist aber beim reinen Hochdruckwasserstrahl mit einem unkontrollierten Zerplatzen der Wafer zu rechnen. Das spröde Material reagiert auf den energiereichen Wasserstrahl wie Glas beim Auftreffen eines Steines.

Beim Wasserstrahlschneiden mit Abrasivmittel beschleunigt der Wasserstrahl kleine Schleifmittelpartikel auf eine sehr hohe Geschwindigkeit. Die Partikel bewirken mit ihren Kanten eine Mikrozerspannung. Dieser für das Trennen von Metallen typische Wirkmechanismus gilt für das spröde Silizium nur sehr eingeschränkt. Überwiegend schlagen die beschleunigten Partikel größere Werkstoffteile ab. Es kommt zu Abplatzungen und Rissen im Schnittbereich (Bild 2).

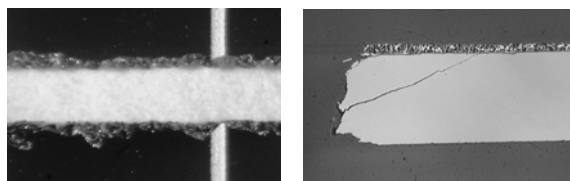


Bild 2 Wasserabrasivstrahlschneiden: Schnittfuge mit Abplatzungen, Breite der Fuge ca. 1 mm (links) Schliffbild mit Riß (rechts)

Messungen der Bruchempfindlichkeit von Probestreifen bestätigten das massive Auftreten von Rissen. Es traten an den Solarzellen erhebliche elektrische Defekte bis zum Ausfall ganzer Zonen auf.

Dieses Wasserabrasivstrahlschneiden ist für das Trennen großer Materialdicken entwickelt worden. Es erwies sich für das Konturschneiden von Solarzellen als ungeeignet. Die Größe der Partikel und ihre kinetische Energie sind für die hier vorliegende Bearbeitungsaufgabe viel zu hoch.

Das wasserstrahlgeführte Laserschneiden – ein Präzisionsverfahren

Ein Verfahren, das die Vorzüge des Laserstrahles und des Hochdruckwasserstrahles kombiniert und deren Nachteile ausschließt, ist die Materialbearbeitung mit dem Laser-Microjet®. Ein Laserstrahl wird unter Ausnutzen der Totalreflexion im Inneren eines Wasserstrahls auf das Werkstück geführt. Der sehr dünne Wasserstrahl im Druckbereich von 20 bis 500 bar, Durchmesser ca. 0,1 mm, wirkt wie ein Lichtleiter und kühlt außerdem sehr wirkungsvoll die Bearbeitungszone. Dies hat im Vergleich zum herkömmlichen Laserschneiden weiterhin den Vorteil, daß der quasi-parallele Laserstrahl mit hoher Leistungsdichte von mehr als 50 MW/cm² über eine Länge von bis zu 100 mm für die Bearbeitung zur Verfügung steht. Es können gepulste Festkörperlaser mit Leistungen von einigen Watt bis 1 kW eingekoppelt werden. Die Maßabweichungen der Schnitte können dank der geringen Schnittfugenbreite unter 0,01 mm liegen. Voraussetzungen dafür bietet der schwingungsarme Aufbau der Gesamtanlage. Diese Technologie ist für die Bearbeitung sensibler Werkstoffe im Dickenbereich bis 3 mm besonders geeignet.

Bei den Schneidversuchen mit dem Laser-Microjet® in Siliziumzellen traten nur geringfügige Schädigungen der Bearbeitungsrandschicht auf. Die Schnittflächen sind optisch einwandfrei (Bild 3).

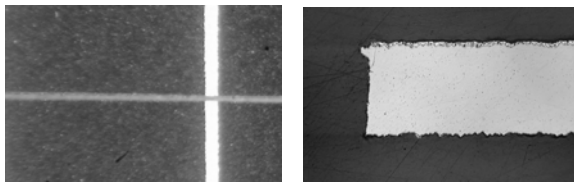


Bild 3 Laser-Microjet®: Schnittfuge, Breite der Fuge ca. 0,1 mm (links) Schliffbild quer zu einer Schnittfläche (rechts)

Die Messungen des Wirkungsgradverlaufes über die Zellfläche zeigen in den Kurzschlußstrom- und Reflexions-Topogrammen keine verfahrensbedingten

Wirkungsgradverluste an den Schnittkanten. Die erreichte hohe Schneidgeschwindigkeit entspricht der des herkömmlichen Laser- oder Wasserstrahlschneidens, jedoch bei erhöhter Qualität und Funktionalität des Schneidergebnisses.

Mit dem CNC-gesteuerten Laser-Microjet® läßt sich jede beliebige 2D-Kontur in Solarzellen schneiden. Anschnitte im Material sind problemlos möglich. Bild 4 zeigt einige Demonstrationsmuster.



Bild 4 Beispiele für konturgeschnittene Solarzellen mit dem Laser-Microjet®

Zusammenfassung und Ausblick

In Tabelle 1 werden die untersuchten Strahltechnologien bezüglich ihrer Hauptmerkmale miteinander verglichen.

Für die zu lösende Bearbeitungsaufgabe erwies sich das wasserstrahlgeführte Laserschneiden als einzig geeignetes Verfahren. Unter dem Namen Laser-Microjet® befindet es sich für andere Schneidaufgaben bereits im industriellen Einsatz. Die Produktivität, Präzision und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens rechtfertigen den technischen Aufwand der Kombination zweier Strahltechnologien in einer Präzisionsmaschine bereits bei einfachen Schnitten in Solarzellen. Bei komplizierten Konturen und gleichzeitig hohen Genauigkeitsforderungen kommen die Vorteile des Verfahrens noch stärker zum Tragen.

Das FuE-Projekt wurde im Programm Forschungsk Kooperation der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

	Wasserabrasivstrahl	Laserstrahl	Laser-Microjet®
Bearbeitbare Werkstoffe	alle Werkstoffe, außer extrem harte	schmelzbare Werkstoffe, außer hoch reflektierende	schmelzbare Werkstoffe, außer hoch reflektierende
Wirtschaftliche Materialdicke	5 ... 50 mm	1 ... 15 mm	0 ... 3 mm
Minimaler Schneidspalt	0,8 mm	0,1 mm	0,05 mm
Technologiebedingte Maßtoleranzen	0,2 mm	0,05 mm	0,01 mm
Abstand Werkzeug zu Werkstück	2 ± 0,5 mm	0,5 ± 0,1 mm	1 ... 100 mm
Wärmeeintrag in das Werkstück	kein Wärmeeintrag	hoch	sehr gering
Schneidgeschwindigkeit in Si-Wafer	je nach Kontur bis 10 m/min, Spitzenwerte von 100 m/min möglich		

Tabelle 1 Vergleich von Hauptmerkmalen der Strahltechnologien