

## Dual-Core-Mikroskop verbindet Konfokalmikroskopie und Interferometrie

### Nanometergenaue und sekundenschnelle 3D-Charakterisierung am Beispiel von Solarzellen

Roger Artigas<sup>1</sup>, Anja Schué<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sensofar-Tech, Terrassa, Spanien, <sup>2</sup>Leica Microsystems, Wetzlar, Deutschland

In der berührungslosen Oberflächenmetrologie sind Interferometrie und optisches Profiling auf konfokaler Basis etablierte aber meist konkurrierende Verfahren. Leica Microsystems und das spanische Unternehmen Sensofar-Tech haben ein Dual-Core 3D-Messmikroskop entwickelt, das Konfokal- und Interferometrieverfahren in einem System verbindet (Abbildung 1).

Als kompakte und robuste Komplettlösung ermöglicht das Leica DCM 3D effiziente, kontaktfreie



Abbildung 1: Das Dual-Core 3D-Messmikroskop Leica DCM 3D mit Konfokal- und Interferometrietechnologie in einem Sensorkopf

Bewertungen der Mikro- und Nano-geometrien von Werkstoffoberflächen. Insbesondere bei der Qualitätssicherung von Solarzellen bietet dieses System eine sekundenschnelle 3D-Messung der Oberflächentextur und erspart zeitaufwändige REM-Analysen. Das System eignet sich darüber hinaus für vielfältige Messanwendungen in F&E- und Qualitätssicherungslabors bis hin zu automatisierten Online-Prozesskontrollen, wo hohe Geschwindigkeiten und Auflösungen bis 0,1 Nanometer erforderlich sind.

## Monokristallines und polykristallines Silizium



Abbildung 2: Solarzelle auf einem monokristallinen Silizium-Wafer

Das am häufigsten eingesetztes Grundmaterial für Solarzellen ist Silizium. In der großtechnischen Solar-energieerzeugung haben die sogenannten Dickschichtzellen den größten Anteil, wobei zwischen monokristallinen und polykristallinen Zellen unterschieden wird. Monokristalline Zellen werden aus einkristallinen Silizium-Wafern hergestellt, wie sie auch für die Halbleiterherstellung verwendet werden. Polykristalline Zellen bestehen aus Scheiben, die nicht überall die gleiche Kristallorientierung aufweisen. Sie können unter anderem

durch Gießverfahren hergestellt werden und sind preiswerter als monokristalline Zellen. Die Effizienz der Solarzelle ist abhängig von der Siliziumdotierung, der Leuchtdichte und dem genutzten Lichtwellenlängenbereich, der optischen Dicke und der Oberflächentextur. Aktuell liegt die Energieeffizienz einer Solarzelle bei etwa 20 Prozent. Durch spezielle, aber sehr teure Oberflächenbehandlungen kann die Solarzelle mehr Licht einfangen, und die Effizienz erhöht sich. Insbesondere für die Raumfahrt sind Solarzellen mit maximaler Effizienz besonders wichtig.

### Oberflächentextur erhöht Energieeffizienz

Um die Zelleffizienz zu steigern, wurden zahlreiche Verfahren geprüft, zum Beispiel Lichtfokussierung mit Fresnel-Linsen, Solarkonzentratoren oder Antireflexionsbeschichtungen. Die effektivste Methode zur Erhöhung der Lichtabsorption stellt die Erhöhung der effektiven Dicke der Siliziumschicht dar. Diese Methode, die als Oberflächentexturierung bezeichnet wird, ist in hohem Maße von der Art des Siliziums abhängig.

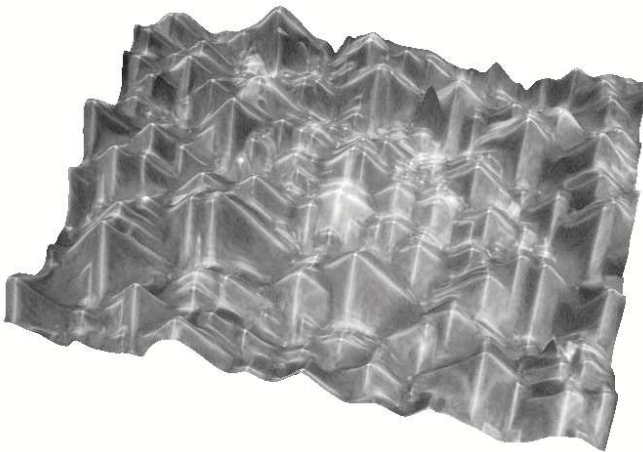


Abbildung 3: Monokristalline Siliziumoberfläche nach dem kristallografischen Nassätzen  $\{111\}$ . Die pyramidenförmige Oberflächentextur erhöht die Lichtabsorption bis um das 50fache und führt somit zu einer Steigerung der Zelleffizienz.

Die Texturierung von monokristallinem Silizium erfolgt durch einen anisotropen Nass-Ätzprozess auf der Grundlage einer Natriumhydroxidlösung. Dabei wird die kristallografische Siliziumebene  $\{111\}$  langsam geätzt. Das Ergebnis sind willkürlich gewachsene, quadratische Pyramiden mit gleichen Pyramidenwinkeln. Die Qualität der Oberfläche und die Anzahl der Pyramiden werden durch Temperatur und Zusammensetzung der Ätzlösung bestimmt. Diese Oberflächentextur weist eine sehr effektive Lichtabsorption auf und fördert somit die interne Lichtreflexion.

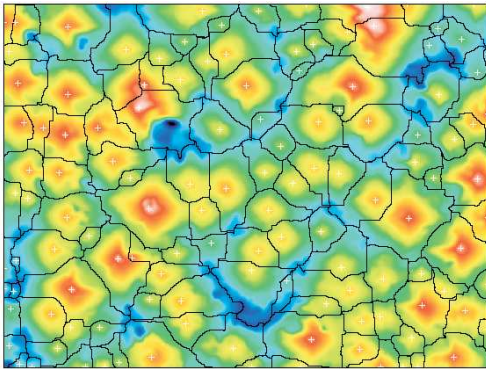
Im Vergleich dazu ist die Texturierung bei polykristallinem Silizium nicht ganz so effektiv, da ein Großteil der Körner eine nicht geeignete Ausrichtung aufweist. Die Körner ätzen dadurch unterschiedlich schnell, wodurch sich an den Körnergrenzen Sprünge herausbilden können, die wiederum Schwierigkeiten beim nachfolgenden Bedrucken mit den Lötzonen und der Kontaktierstruktur verursachen.

### 3D-Oberflächenmessung innerhalb von Sekunden

Bei der Qualitätskontrolle der Solarzellen am Ende der Fertigungskette wird die Effizienz jeder einzelnen Zelle geprüft. Das optische Imaging-Profilometer Leica DCM 3D mit Dual-Core-Technologie bietet hierbei die Möglichkeit, innerhalb weniger Sekunden die Texturierung, die Rauheit, die statistische Pyramidencharakterisierung und die Metallkontakte einer Siliziumoberfläche zu prüfen.

Im Gegensatz zum zeitaufwändigen Einsatz eines Rasterelektronenmikroskops wird der Wafer einfach unter das Leica DCM 3D gelegt und innerhalb von weniger als 10 Sekunden eine 3D-Messung vorgenommen. Die starke lokale Neigung der Pyramidenflächen erfordert die Verwendung von Objektiven mit hoher Numerischer Apertur, die wiederum nur in der Konfokaltechnologie verfügbar sind.

Abbildung 3 zeigt eine 3D-Messung eines monokristallinen Siliziumwafers nach dem Pyramiden-Ätzen. Für eine derartige 3D-Messung wurde ein 150x Objektiv mit einer Numerischen Apertur von 0,95 verwendet.



Dadurch reduzierte sich das Sichtfeld auf einige zehn Mikrometer, was etwa dem Sichtfeld eines REM entspricht. Die Oberfläche wird einige Mikrometer entlang der Fokusposition des Objektivs abgerastert; daraus ergeben sich schichtweise konfokale Bildstapel. Das Ergebnis ist ein hochaufgelöstes, REM-ähnliches Bild mit unbegrenztem Fokus und präzisen 3D-Informationen zur Höhe der Pyramiden.

Abbildung 4: Automatische Segmentierung durch den intelligenten, auf Wasserscheiden-Segmentierung basierenden Algorithmus in einzelnen Pyramiden

Zur statistischen Charakterisierung der Pyramiden wird die sogenannte Wasserscheiden-Segmentierung (Watershed Segmentation) verwendet (Abbildung 4).

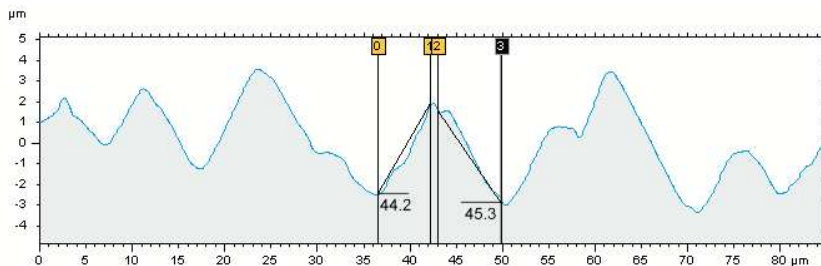
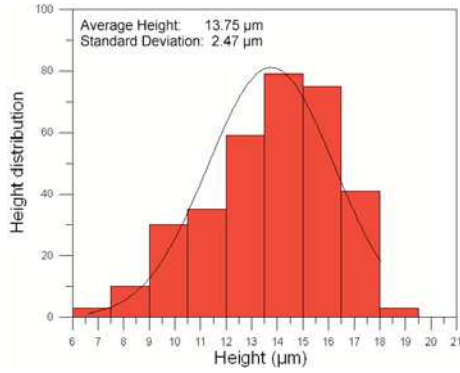


Abbildung 5: Profilschnitt der Pyramiden auf einer monokristallinen Siliziumoberfläche

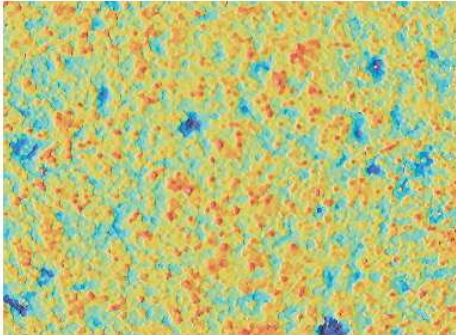
Über diesen Algorithmus wird jede einzelne Pyramide mit Hilfe der Höhenangabe in Segmente unterteilt und anschließend für jedes einzelne Segment die Fläche, das Volumen, die durchschnittliche und die maximale Höhe berechnet.



In Abbildung 5 zeigt ein Profilschnitt die Charakterisierung einer einzelnen Pyramide mit Höhe, Grundfläche und Neigungswinkel der Seitenflächen.

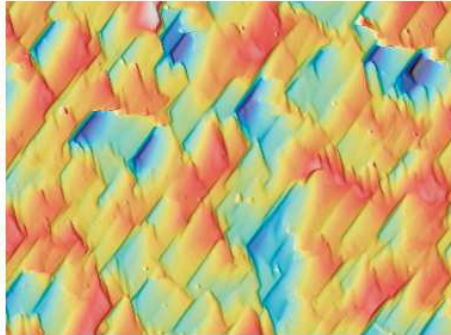
Abbildung 6: Über die statistische Höhenverteilung in der Segmentierung lassen sich Oberflächenstrukturen charakterisieren.

Mono-crystalline surface



Sa: 0.68357 µm  
Sq: 0.89719 µm  
St: 9.41100 µm

Poly-crystalline surface



Sa: 0.41899 µm  
Sq: 0.53585 µm  
St: 4.10607 µm

Abbildung 7: Typische Oberflächenparameter (z. B. Rauigkeit) der Oberflächen von monokristallinem und polykristallinem Silizium im Vergleich

**Technologie mit kombinierter Präzision**



Abbildung 8: Der optische Aufbau des Leica DCM 3D

Das Dual-Core 3D Messmikroskop Leica DCM 3D bietet eine einzigartige Kombination von Konfokalmikroskopie und Interferometrie in einem einzigen Sensorkopf (Abbildung 8). Die Kern-technologie basiert auf einem schnell reagierenden Mikrodisplay, das in der Leuchtfeldblende positioniert ist. Über das Mikrodisplay können Hellfeld-, Interferometrie- und Konfokalbilder erzeugt werden (Abbildung 9). Das Konzept ohne mechanisch bewegliche Komponenten, das konfokale Mikrodisplay (MD), zwei Lichtquellen und zwei Kameras sorgen für hochpräzise 3D-Messungen und unbegrenzte Schärfentiefe.

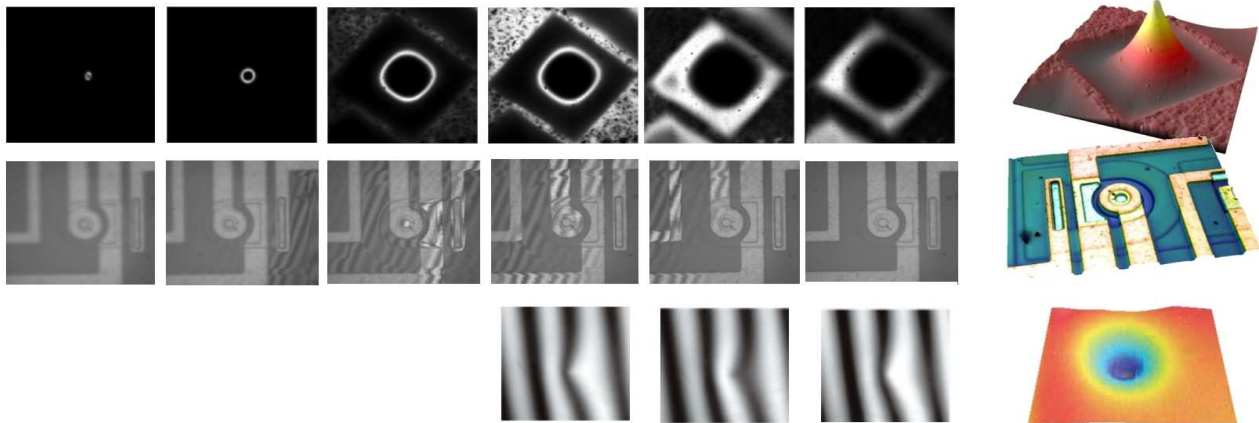


Abbildung 9: Konfokaltechnik, VSI- und PSI-Profilometrie

Die konfokale MD-Technologie misst glatte sowie raue Oberflächen, Höhenunterschiede von wenigen Nanometern bis zu mehreren Millimetern und Flanken bis zu 70°. Im Gegensatz zu Laserscanning- bzw. Spinning-Disk-Systemen benötigt die MD-Konfokaltechnik keine mechanisch beweglichen Komponenten, was die Bildstabilität bei hohen Vergrößerungen und die Lichtausbeute erhöht sowie Zuverlässigkeit und Flexibilität verbessert. In Verbindung mit einer LED-basierten Lichtquelle verlängert die MD-Technologie die Lebenszeit des Geräts, reduziert die Wartungskosten und vermeidet Kosten für teure Ersatzteile.

Oberflächenmessungen werden in Sekundenschnelle ausgeführt. Das System ist dabei sehr leicht zu bedienen: Die Probe wird einfach unter das Mikroskop gelegt und scharf gestellt. Mit einem Tastendruck wird in wenigen Sekunden ein 3D-Bild der Oberfläche erzeugt.

### Neue Qualität im optischen Profiling

Ein weiterer Vorteil sind die beiden integrierten CCD-Kameras, eine Farbkamera für Hellfeld-Analysen sowie eine hochwertige monochromatische Kamera für die metrologische Detektion. Während der 3D-Messung werden gleichzeitig ein hochauflösendes und kontrastreiches Konfokalbild und ein unbegrenzt scharfes Farbbild erfasst. Die Software erlaubt eine 3D-Abbildung der Fläche in unterschiedlichen Farbmodi wie zum Beispiel Falschfarbendarstellung der Höheninformationen, Konfokal-Stapel, unbegrenzt scharfes Farbbild und hochauflösende Konfokalluminanz mit dem Chrominanzsignal der Farbkamera (Abbildung 10).

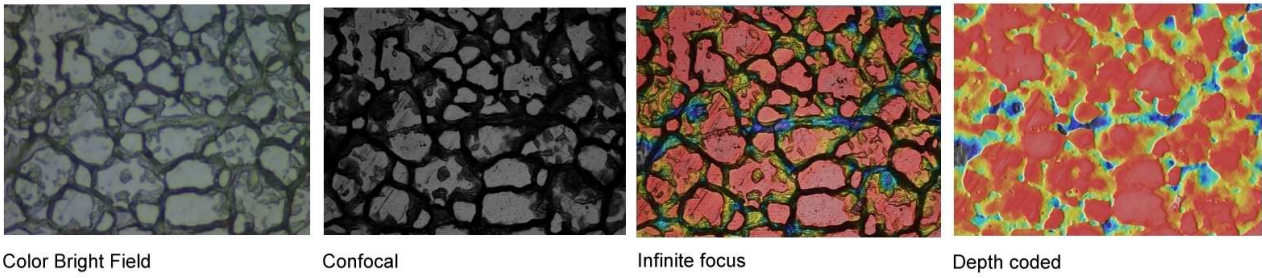


Abbildung 10: Mikroskopbetriebsarten

Ein Hauptvorteil der Konfokaltechnik für die 3D-Profilometrie ist ihre Flexibilität, auch Mikroskopobjektive zu verwenden, die ursprünglich für die Hellfeldmikroskopie vorgesehen sind. Diese Objektive sind oft bereits verfügbar: beispielsweise Objektive mit einem großem Arbeitsabstand für Proben mit großen Höhenunterschieden oder für Probengeometrien, die mit herkömmlichen Objektiven kollidieren würden: Objektive mit verstellbarer Korrektur, die für eine Fokussierung durch Deckgläser konzipiert wurden; Objektive für die LCD-Untersuchung oder Wasserimmersionsobjektive. Dennoch ist hierbei die Höhenauflösung durch die Numerische Apertur und damit die Schärfentiefe des Objektivs begrenzt. Schwach vergrößernde Objektive haben eine niedrigere Numerische Apertur, und konventionelle Konfokal-3D-Messungen neigen zu stärkerem Rauschen. Durch seine innovative Kombination der Konfokal- und Interferometrie-technik deckt das Leica DCM 3D den weitesten messbaren Oberflächenhöhenbereich ab.

Im Vergleich zur Konfokaltechnik hängt bei der Phasen-Shift-Interferometrie (PSI) und der Vertical-Shift-Interferometrie (VSI) die Höhenauflösung nicht von der Numerischen Apertur des Objektivs ab, sondern von den Eigenschaften der Lichtquelle. Bei einer PSI-Höhenauflösung bis 0,1 Nanometer ist die maximal messbare Höhe durch optische Gesetze auf 250 Nanometer begrenzt. Durch die kombinierten Techniken des Leica DCM 3D werden dennoch Messungen von 0,1 Nanometer bis hin zu mehreren Millimetern möglich.