

Analyse der Elektrolumineszenz mit empfindlichen Infrarot-Kameras

Dünnschicht-Solarzellen auf dem SWIR-Prüfstand

Stromgewinnung aus Sonnenlicht durch Dünnschicht-Solarzellen in CGIS (Kupfer-Gallium-Indium-Diselenid)-Technologie bietet entscheidende wirtschaftliche Vorteile wie leichtgewichtige und flexible Module, benötigt nur geringen Energie- wie auch Materialeinsatz zu ihrer Herstellung und liefert gute Energieausbeute über ein breites Spektrum sogar unter ungünstigen Witterungsbedingungen. Durch Analyse der im nahen Infrarot auftretenden Elektrolumineszenz mit empfindlichen SWIR-Kameras in InGaAs-Technologie lassen sich Solarmodule eingehend untersuchen.

Die Analyse der im nahen Infrarot auftretenden Elektrolumineszenz mit empfindlichen SWIR-Kameras in InGaAs-Technologie verkürzt den Entwicklungszyklus neuer Modultypen und sorgt in der Modulfertigung für gute Übereinstimmung der Komponenten mit dem Ziel einer hohen Zuverlässigkeit ertragsfähiger photovoltaischer Anlagen über eine lange Betriebsdauer.

CGIS-Dünnschicht-Solarzellentechnologie

Dünnschicht-Solarzellen werden aus nur einige Mikrometer dünnen Halbleiterschichten aufgebaut. Dadurch ist es insbesondere möglich, Solarzellen in Funktions- und Gestaltungselemente, wie Dachschindeln, Dachziegel, Gebäudefassaden oder die Verglasung von Lichtkuppeln und Lichthöfen zu integrieren. Dabei dürfte die Solarzellenversion von Dachschindeln die gleichen Schutz- und Haltbarkeitsanforderungen herkömmlicher Bitumen-Schindeln erfüllen. Vor allem lassen sich nicht nur flächige Satteldächer, sondern auch andere Dachformen, wie der Turm im Hintergrund von **Bild 1**, zur Energiegewinnung nutzen.

Als Material für Dünnschicht-Solarzellen kommen heute vor allem kristallines Silizium (Si), CGIS (Kupfer-Gallium-Indium-Diselenid) oder das Gallium-freie CIS so-



Bild 1: Mit flexiblen Dünnschicht-Solarzellen können auch Formdächer und Fassaden Strom liefern

wie Cadmium-Tellurid (CdTe) in Frage. Damit bieten sich schon heute interessante Marktchancen, deren langfristiger Erfolg aber von der Steigerung des Wirkungsgrades und Senkung der Kosten abhängen wird.

Allerdings ist über deren Verhalten bei unterschiedlichen Licht- und Wetterbedingungen noch nicht soviel bekannt, wie über die Zellen und Module aus kristallinem Silizium, die innerhalb des letzten Vierteljahrhunderts schon einen beachtlichen Reifegrad erreichen konnten. Für eingehende Versuche an Solar-

modulen aus Dünnschichtzellen und deren Qualitätssicherung in der Fertigung stehen heute sehr leistungsfähige und aussagekräftige Untersuchungsmethoden zur Verfügung, welche deren Marktreife wesentlich beschleunigen und die Fertigungsqualität nachhaltig steigern werden.

Elektrolumineszenz – schwach aber aussagekräftig

Eines der wichtigsten Phänomene dafür ist die für alle funktionellen photovoltaischen Zellen auftretende Elektrolumineszenz: Die schwache Lichtemission einer Solarzelle, die mit einer externen Spannung beaufschlagt wird. Eine Solarzelle lässt sich als die Parallelschaltung vieler PN-Übergänge betrachten. Die externe Vorspannung injiziert Elektronen in diese PN-Übergänge, welche sich teilweise mit vorhandenen Löchern rekombinieren. Die überschüssige Energie wird in Photonen umgesetzt, deren Wellenlänge von der Bandlücke (bandgap) des Absorber-Materials der Solarzelle abhängt.

In **Tabelle 1** ist der für vier kommerziell verfügbare Solarzellentypen geltende ►

Typ	Material	Bandlücke [eV]	Wellenlänge [µm]
CdTe	Cadmium-Tellurid	1,4	0,8
CGIS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid	0,9 bis 1,7*	1,3 bis 0,7*
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid	0,9	1,3
Si	kristallines Silizium	1,2	1,2
zum Vergleich: VISWIR-Kamera in InGaAs-Technologie			0,4 bis 1,7

Tabelle 1: Eigenschaften kommerzieller Materialien für Dünnschicht-Solarzellen; * abhängig vom Verhältnis Indium/Gallium

AUTOR
Raf Vandersmissen, Xenics NV,
Leuven, Belgien

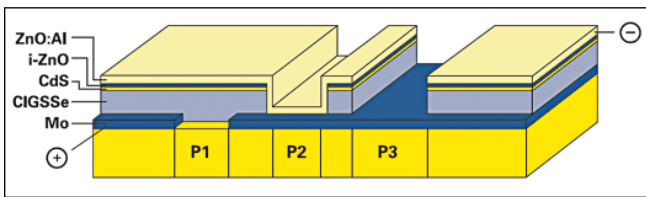


Bild 2: Prinzipaufbau einer CGIS-Dünnschicht-Solarzelle mit monolithischer Serienschaltung von zwei Einzelzellen

Bild 3: Elektrolumineszenzaufnahme eines CGIS-Panels mit empfindlicher SWIR-Kamera zeigt die typische Nadelstreifenstruktur mit dunklen Fehlstellen, die auf lokale Kurzschlüsse hinweisen können (Quelle: Photovoltaik-Institut, Berlin)



Zusammenhang zwischen Bandlücken-Energie und der daraus resultierenden Wellenlänge einer Elektrolumineszenz-Strahlung zusammengestellt, in der zum Vergleich auch das Aufnahmespektrum einer VISWIR-Kamera in InGaAs-Technologie zu finden ist.

Dünnschicht-Module in CGIS-Technologie weisen übrigens abhängig vom Verhältnis der Indium- und Gallium-Anteile Bandlücken-Energien zwischen 0,9 bis etwa 1,7 eV auf: Mehr Indium verschiebt die Energie zu niedrigeren Werten, mehr Gallium steigert sie.

Damit erstrecken sich die Wellenlängen ihrer elektrolumineszenten Strahlung von etwa 800 bis etwa 1200 nm. Dies ist auch der Bereich, in dem SWIR-Bildsensoren ihre größte Empfindlichkeit aufweisen. Um auch breitere Bandlücken, die in den sichtbaren Bereich hineinreichen, noch abdecken zu können, und für Parallelaufnahmen im sichtbaren und IR-Bereich geht der Trend bei den Bildaufnehmern zu größerer Bandbreite, die mit geeigneten Maßnahmen zum VISWIR-Sensor-Array mit einer hohen spektralen Empfindlichkeit im

Wellenlängenbereich von 0,4 bis 1,7 μm führen.

Die Intensität der abgegebenen elektrolumineszenten Strahlung bestimmt sich aus der Konzentration von Elektronen und Löchern, die ihrerseits exponentiell von der angelegten Vorspannung abhängt, wie es von der bekannten IU-Kurve einer Diode auch erwartet werden kann. Aus der Messung dieser Strahlungsintensität einer Solarzelle lassen sich wertvolle, räumlich aufgelöste Details über Mechanismen gewinnen, die für eine Leistungsminderung des Solarmoduls verantwortlich sein können, wie lokal verringerte Diffusionslängen, Mikrorisse in der Zelle, Parallelwiderstände und Verunreinigungen der Halbleiterschichten.

Ein Blick auf den Querschnitt einer CGIS-Dünnschicht-Solarzelle mit monolithischer Serienschaltung mit der nächsten Zelle (**Bild 2**) zeigt drei kritische Bereiche, in denen beispielsweise unter die abdeckende, transparente und leitende Oxidschicht TCO (transparent and conductive oxide layers) eindringende Feuchte die Zelleigenschaften verschlechtern

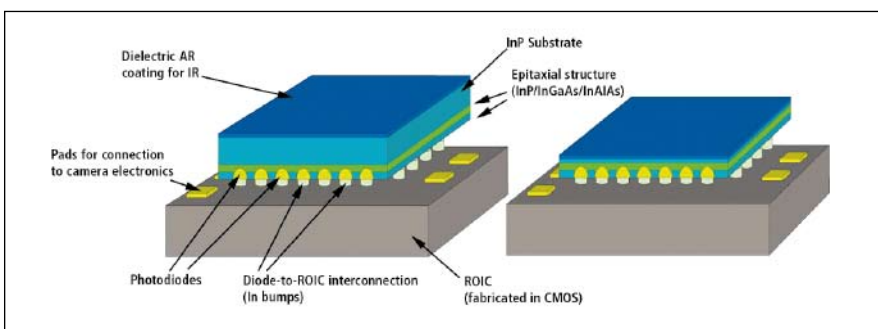


Bild 4: SWIR-Bildaufnehmer in InGaAs-Technologie (links) wird durch Ausdünnung des Substrats zum breitbandigen VISWIR-Sensor (rechts)

kann: Im Bereich P1 sinkender Parallelwiderstand (Shunt R_{sh}), bei P2 korrodierender ZnO/Mo-Kontakt und bei P3 ansteigender Serienwiderstand R_s durch Korrosion der Molybdän-Schicht führen unter Umständen zu erheblicher Leistungsminderung. Wie aus der Elektrolumineszenz-Aufnahme eines CGIS-Moduls (**Bild 3**) deutlich hervorgeht, bietet das Verfahren relativ schnelle und genaue Informationen über das Modul in seiner Gesamtheit, die für Forschung und Entwicklung wie auch die Produktionssteuerung von großem Wert sind.

SWIR-Bildaufnehmer in InGaAs-Technologie

Den Aufbau eines SWIR-Bildaufnehmers in InGaAs-Technologie für den Wellenlängenbereich 0,9 bis 1,7 μm zeigt **Bild 4**: Auf einem InP-Epiwafer-Substrat werden die Infrarot-Photodioden erzeugt. Weil diese Technologie nicht besonders gut für die Realisierung von Ausleseschaltungen geeignet ist, wird das Photodioden-Array kopfüber (Flipchip) auf ein CMOS-Chip mit der Ausleseelektronik ROIC (read out integrated circuit) mittels Indium-Kügelchen (Bumps) montiert. Die Belichtung erfolgt dann von hinten durch das Substrat, das allerdings alles Licht im sichtbaren Bereich und bis 0,9 μm absorbiert.

Um dies zu verhindern, wird das Substrat durch eine neuartige Methode nach der Flipchip-Montage stark ausgedünnt: Zum sicheren Abtragen des Substrats ohne Beschädigung des InGaAs-Detektors werden daher knapp unterhalb der Photodioden zusätzliche Schichten aus InGaAsP eingebracht, die in der InP-Umgebung als Ätzstop wirken. Eine nachfolgende Ätzung mit Salzsäure HCl entfernt das InP-Epi-Substrat selektiv und genau bis zur InGaAsP Ätzstop-Schicht. Dies verdünnt das Sensor-Chip noch stärker als üblich auf nur 5 μm (**Bild 4 rechts**). Damit wird es durchsichtig und gibt den Strahlengang für sichtbares Licht frei, so dass der Sensor den breiten Wellenlängenbereich von 0,4 μm bis 1,7 μm empfangen kann.

Bei der Elektrolumineszenz handelt es sich um eine Strahlung sehr geringer Intensität, die hohe Ansprüche an die eingesetzte Messtechnik stellt. So sind für deren genaue quantitative Erfassung lange In-

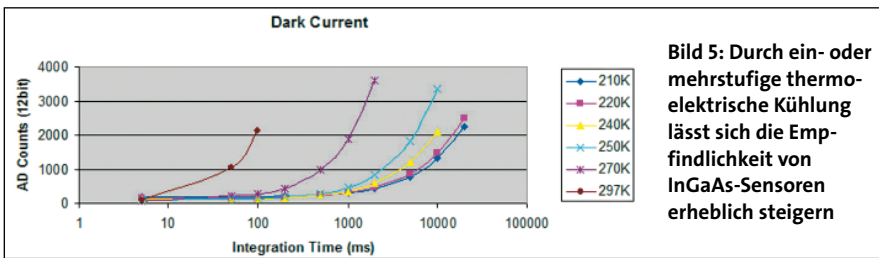


Bild 5: Durch ein- oder mehrstufige thermoelektrische Kühlung lässt sich die Empfindlichkeit von InGaAs-Sensoren erheblich steigern

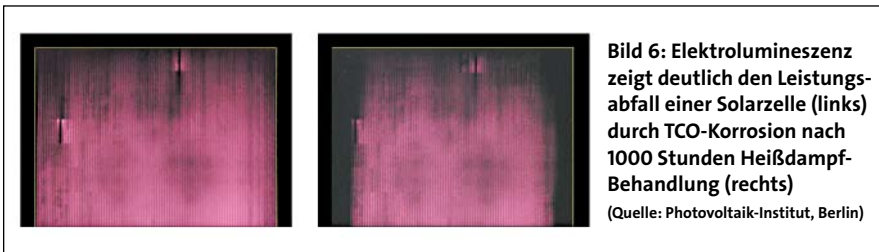


Bild 6: Elektrolumineszenz zeigt deutlich den Leistungsabfall einer Solarzelle (links) durch TCO-Korrosion nach 1000 Stunden Heißdampf-Behandlung (rechts)
(Quelle: Photovoltaik-Institut, Berlin)

tegrationszeiten notwendig. Hier setzt der Dunkelstrom des Bildaufnehmers eine Grenze, der insbesondere bei genaueren Untersuchungen bei der Gestaltung neuartiger photovoltaischer Zellen und Module stört. Er lässt sich durch rauscharme Auslegung des Sensors, z. B. in der empfindlichen SWIR-Kamera XEVA 1.7 320 von Xenics, und durch ein- oder mehrstufige thermoelektrische Kühlung des Sensor-Arrays (**Bild 5**) so weit reduzieren, dass eine um den Faktor 100 längere Integrationszeit möglich ist, die auch schwach ausgebildete Fehlstellen nicht im Rauschen verschwinden lässt.

Aussagekräftige Messergebnisse

Welche schon auf den ersten Blick sichtbare Aussagekraft die mit einer SWIR-Kamera aufgenommene Elektrolumineszenzstrahlung im nahen Infrarot hat, wird mit **Bild 6** deutlich: Zu Beginn eines Korrosionstests (links) strahlte das Modul noch über die gesamte Fläche. Nach längerer Heißdampfbehandlung über 1000 Stunden zeigte sich bei diesem – offenbar nicht optimal eingebauten – Prüfling insbesondere an den Rändern eine erhebliche TCO-Korrosion (rechts), die wegen der Verringerung der Shunt-Widerstände R_{sh} und Vergrößerung der Serienwiderstände R_s die Leistung praktisch halbierte.

Fazit

Die Analyse der schwachen Elektrolumineszenz photovoltaischer Zellen und Module durch empfindliche Infrarot-Kameras unterstützt die Entwicklung von Dünnschicht-Solarzellen, ihre Integration in funktionelle Trägerstrukturen und die Qualitätssicherung in der Fertigung mit dem Ziel, den Entwicklungsvorsprung herkömmlicher Solarzellen zu verringern und neuartige Versorgungslösungen mit kostenloser Sonnenenergie zu gestalten.

MIT INFRAROT FEHLER IN SILIZIUMBLÖCKEN AUFSPÜREN

Die Wirtschaftlichkeit einer Fertigung photovoltaischer Zellen in Dickschicht-Technologie kann durch Inspektion der angelieferten und teilbearbeiteten Siliziumblöcke mit Infrarot-Kameras wesentlich gesteigert werden. Das reine Siliziummaterial ist nämlich für Infrarotstrahlung praktisch durchsichtig, so dass ein fehlerfreier Block glasklar erscheint. Sind aber Fehler, wie Einschlüsse oder Risse vorhanden, dann absorbieren diese Inhomogenitäten einen Teil der Infrarotstrahlung, was sie sichtbar macht (**Bild 7**).

Besonders störend sind Einschlüsse aus Siliziumkarbid SiC, einem Material, das sich durch außergewöhnliche Härte auszeichnet und deshalb gerne zum Schleifen (als Carborund) verwendet wird. Auch in einem Siliziumblock wirkt es abrasiv und zerstört die zum Trennen des Siliziumblocks in Wafer verwendeten Sägedrähte. Deren Beschädigung muss aber unbedingt verhindert werden, denn Aus- und Einbau mit Reparatur und Neujustierung kann den Betrieb einer Drahtsäge für Stunden unterbrechen.

Für diesen Zweck hat RMB-Technologies aus Kleinostheim (www.rmb-technologies.com) ein leistungsfähiges, universell einsetzbares Inspektionssystem

tem für die Photovoltaik-Industrie auf der Basis von Infrarot-Bildaufnehmern von Xenics entwickelt, das sich für den Eingangstest roher Blöcke und die Zwischenprüfung polierter Exemplare vor dem Sägen vorteilhaft einsetzen lässt. Es arbeitet im SWIR-Wellenlängenbereich von 1200 bis 1700 μm im Durchlichtverfahren für Blöcke bis zu einer Stärke von 210 mm.

Die Messergebnisse werden als dreidimensionale Grafik dargestellt, deren Datensätze zum Ansteuern der Säge dienen können, die den Anschnitt, die Wafer und das Restmaterial abtrennt. Für die besondere Qualität der Messergebnisse sorgt ein patentierte Verfahren, nach dem die Kamera auf vorgebbare Ebenen innerhalb des Siliziumblocks fokussiert werden kann.

Das Silizium-Inspektionssystem analysiert einen Block in weniger als einer Minute. Es eignet sich für den eigenständigen Betrieb mit Handbeschickung,

lässt sich aber auch als automatisch gesteuerte Arbeitsstation in Fertigungslinien integrieren.

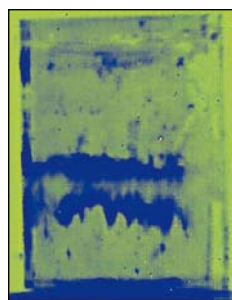


Bild 7: Schon bei der Vorprüfung des rohen Blocks in weniger als einer Minute erkannt: Der sollte besser nicht weiter verarbeitet werden

infoDIRECT 414pr0509
www.productronic.de
 ► Link zu Xenics
 ► Link zum deutschen Vertriebspartner LOT Oriel