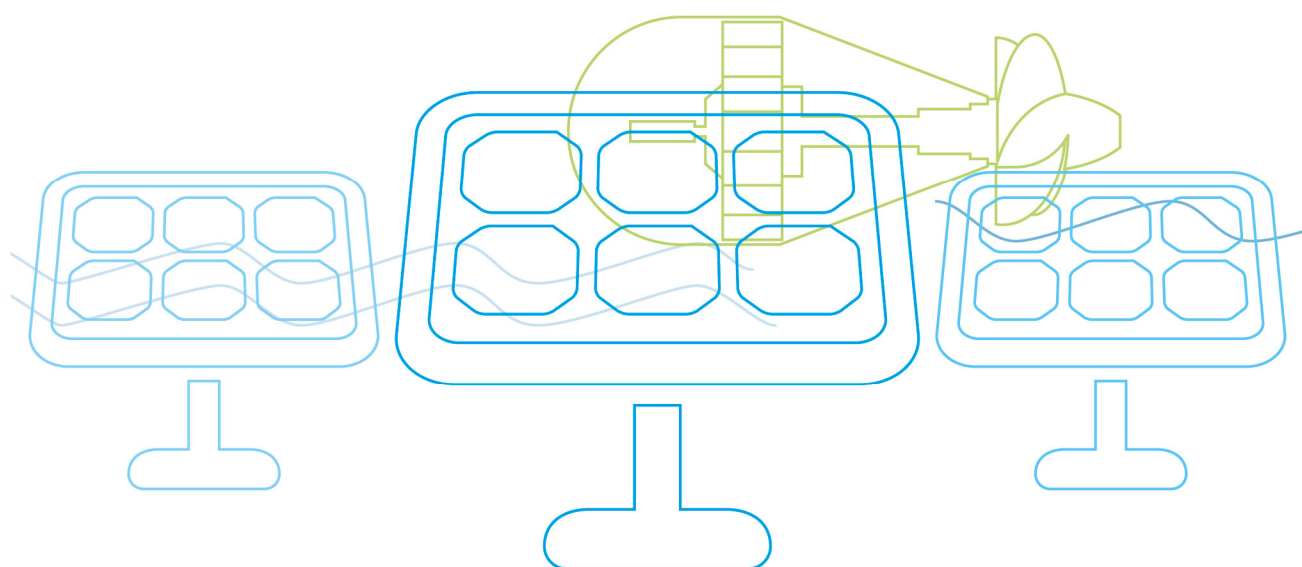




TIPS

Terahertz Probing of Photovoltaic Substrates



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Inhaltliche Darstellung	6
2.1	Theoretische Grundlagen	6
2.2	THz-Versuchsaufbau	7
2.3	THz-Spektroskopie-Messungen	8
2.4	THz-Tomographie-Messungen	9
2.5	THz Emissionsmikroskopie-Messungen	10
2.6	Dissemination	11
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	11
4	Ausblick und Empfehlungen	11
5	Literaturverzeichnis	12
6	Kontaktdaten	12

1 Einleitung

Für die Forschung und Entwicklung von für die Photovoltaik geeigneten Materialien, Zellen, Modulen und Systemen schaffen präzise Mess- und Analysemethoden wichtige Vorteile gegenüber Mitbewerbern. Bisher haben sich elektrische, optische, spektroskopische, röntgenbasierte und thermografische Ansätze, oft auch in Kombinationen eingesetzt, etabliert. Doch selbst diese Fülle an verfügbaren Verfahren lässt eine Reihe von Problemen offen, für die Terahertz-basierte Messansätze Lösungsmöglichkeiten anbieten und die im Folgenden beschrieben werden. Auf Terahertz-Strahlung basierende Messansätze, die im gegenständlichen Projekt untersucht werden, können vor allem komplementäre zerstörungsfreie Lösungen für die folgenden Problemstellungen anbieten:

- **Überprüfung des Schichtaufbaus und der Schichtdicken mittels THz-Tomographie:** Viele Materialien, insbesondere Silizium und die meisten Halbleiter, sind für THz-Strahlung transparent, während Wasser und Metalle stark absorbierend wirken. Dadurch können Schichtdicken und -materialien, bisher nur mit hohem Aufwand möglich, mit THz-Strahlung einfacher und genauer analysiert werden.
- **Zerstörungsfreie Materialanalyse bzw. – charakterisierung über THz-Spektroskopie:** Die Dotierungen in Halbleitern, als auch niederfrequente interne Vibrationsschwingungen liegen im THz-Frequenzbereich. Damit ist die THz-Spektroskopie besonders für Materialanalysen an Photovoltaik-Materialien, -Zellen und -Modulen prädestiniert.
- **Defect-Engineering:** Der enorme Kostenreduktionsdruck in der Photovoltaik-Industrie erfordert immer genauere Mess- und Analysemethoden, um die Fertigungsprozesse (sowohl Halbleiter als auch Dünnschicht) besser verstehen und damit besser steuern zu können. THz-Strahlung kann zusätzliche Informationen über z.B. die Dotierung oder Kristallfehler (siehe THz-Spektroskopie), aber auch über die Ladungsträgerdynamik sowohl bildgebend als auch tomographisch (in die Tiefe, 3D) liefern. Somit können THz-Ansätze in Zukunft eine neue, bisher noch nicht erreichbare, Qualität des Defect-Engineerings ermöglichen.
- **Funktionsprüfung:** Die meisten Halbleitermaterialien emittieren bei Nominal- oder Subnominalbetrieb schwache THz-Strahlung. Eine spektroskopische Erfassung dieser THz-Emission könnte komplementär zu bestehenden Photo- bzw. Elektrolumineszenzansätzen neue Erkenntnisse für die Material- und Prozessentwicklung, aber auch für Fertigungs(end)kontroll- und Qualitätsinspektionssysteme liefern und somit in 10 bis 20 Jahren einen weiteren Entwicklungsschub bei mono-, polykristallinen und Dünnschicht Photovoltaik-Zellen ermöglichen.

Zielsetzung

Die Zielsetzung des gegenständlichen Projekts ist die Erarbeitung von neuen THz-basierten Mess- und Charakterisierungsansätzen für die Photovoltaik-Industrie. Insbesondere werden die Möglichkeiten und Vorteile von THz Strahlung für die orts aufgelöste Erfassung von Parametern wie der (Photo-) Leitfähigkeit, Ladungsträgerdichte oder Verunreinigungen untersucht. Dabei werden sowohl Ansätze verfolgt, die eine elektrische Kontaktierung der Solarzelle erfordern und im Bereich der Fertigungsendkontrolle eingesetzt werden können, als auch kontaktfreie Ansätze für Wafer und Substrate, die zur Charakterisierung des Eingangsmaterials herangezogen werden können. Mit der THz-

Emissionsmikroskopie werden Ansätze untersucht, die eine räumliche Auflösung unter der THz-Wellenlänge ermöglichen und somit auch Strukturen, die kleiner als die THz-Wellenlänge sind, erfassbar machen.

Methodik - Arbeiten

Es wurde über eine Literaturrecherche der Stand der Technik erhoben. Parallel zur Probenbeschaffung wurden die Versuchsaufbauten für orts aufgelöste NIR-Pump-THz-Probe-Spektroskopie mit optischer bzw. elektrischer Anregung und die THz-Emissionsmikroskopie vorbereitet und getestet. Beide Ansätze sind in der Lage größere Probenbereiche abzurastern (mind. 180mm x 180mm). In Folge wurde mit ausgedehnten Experimenten und weiteren Proben die Möglichkeiten dieser beiden Ansätze für innovative Charakterisierungs- und Messverfahren für die Photovoltaik-Industrie evaluiert.

Es wurden die Arbeiten in den Arbeitspaketen THz-Spektroskopie und THz-Tomographie mit entwickelten und optimierten Messaufbauten fortgesetzt. Nach der bereits erfolgten grundsätzlichen Validierung der orts aufgelösten THz-Spektroskopie, war das primäre Ziel für den nächsten Projektabschnitt die Ableitung von Charakterisierungsansätzen und Spezifikationskonstellationen für die genannten Problemstellungen aus der Photovoltaik-Forschung, -Entwicklung und -Produktion.

Im Arbeitspaket Emissionsmikroskopie wurde der THz Emission Imaging Aufbau bezüglich des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) und der räumlichen Auflösung verbessert. In weiterer Folge wurde dieses System verwendet, um THz Emissionsbilddaten mit etablierten Methoden wie MWPCD¹ und OBIC² zu vergleichen. Weiters wurde die Modellierung der THz-Absorption und -Emission der Solarzelle optimiert, damit die THz Messergebnisse mit den Material- und Struktur- parametern der Solarzelle korreliert werden konnten. Abschließend wurde ein optisch-nicht-lineares Experiment unter Verwendung eines verstärkten Titan-Saphir Lasers durchgeführt, um die THz Emission von PV-Silizium-Substraten unter Ausnützung eines optischen Gleichrichtungseffekts an der Silizium-Oberfläche zu erforschen.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Theoretische Grundlagen

Die primäre Zielsetzung in dieser Projektphase war die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen wie THz-Strahlung vorteilhaft im Bereich Photovoltaik eingesetzt werden kann. Über die Analyse der Energieniveaus relevanter Gitter- oder Molekülschwingungen bzw. die Analyse der Ladungsträgerdynamik über die Drude-Theorie können die vorteilhaften Messansätze oder Wellenlängenbereiche bestimmt werden. Die mit THz-Spektroskopie und THz-Tomographie theoretisch messbaren Materialeigenschaften wurden erarbeitet. Bestätigt wurde, dass die Bestimmung der Ladungsträgerlebensdauer und der Photoleitfähigkeit und damit indirekt Effizienz und Defektstruktur der Solarzellen als die vielversprechendsten Ansätze sind.

Die Intensität der THz Emission hängt auch von der Stärke des vorhandenen elektrischen Feldes, des elektrischen Feldes aufgrund des pn-Übergangs oder eines metallischen Schottky-Kontakts ab. Die photogenerierten Ladungsträger müssen in der Nähe eines solchen Feldes generiert werden. Daher ist eine Überlappung des elektrischen Feldes und der Region der optischen Erzeugung von Ladungsträgern

¹ Microwave photo-conductive decay

² Optical Beam Induced Current

ein zentrales Thema für die effiziente Sammlung von photogenerierten Ladungsträger in der Solarzelle. Der Mechanismus, welcher der THz Emission zu Grunde liegt, basiert auf den gleichen Material- und Strukturparametern wie die Sammlung von Ladungsträgern in der Solarzelle. Zusammenfassend können räumliche Variationen in der THz Emission Fehler im Rohstoffmaterial der Solarzelle (Eingangskontrolle) und dem Herstellungsprozesses (Fertigungsendkontrolle) aufzeigen.

Auch die Anzahl der erzeugten Ladungsträger stellt einen wichtigen Parameter dar. Im Allgemeinen sollte die THz-Strahlung linear mit der Leistung der auftreffenden Laserpulse skalieren, solange bis der Sättigungsbereich erreicht ist. Bei solchen Bedingungen, ist die Dichte der photogenerierten Ladungsträger so hoch, dass sie das innere elektrische Feld abschirmen. An diesem Punkt ist es notwendig zu erwähnen, dass, wenn die Ladungsträgerlebensdauer länger ist als die Zeit zwischen zwei Anregungsimpulsen, sich die „non-zero steady-state“ Dichte der photoerzeugten Träger aufbaut. Dieser Effekt kann den Betriebsmodus der Solarzelle erheblich verändern. Die Weiterentwicklung des bestehenden Modells der THz-Emission der Solarzelle zur zusätzlichen Berücksichtigung der beschriebenen nichtlinearen bzw. Sättigungseffekten ist Gegenstand der nächsten Aktivitäten. Das weiterentwickelte Modell wird es möglich machen, die Material- und Strukturparameter von multi- und mono-kristallinen, silizium-basierten Hochleistungs-Solarzellen mittels THz-Messungen zu beurteilen.

2.2 THz-Versuchsaufbau

Die messtechnischen Erfordernisse und Komponenten zur Durchführung von THz-Spektroskopie- und THz-Tomographie-Messungen und Realisierung eines dafür geeigneten Versuchsaufbaus auf dem im Konsortium vorhandenen THz-Equipment wurden erarbeitet. Diese Projektphase umfasste die Planung des Versuchsaufbaus für THz-Spektroskopie und THz-Tomographie, die Evaluierung und Beschaffung der erforderlichen Komponenten inklusive Aufbau und Versuchsmessungen. Die Versuchsaufbauten sind in Betrieb, wurden getestet und mit in der Literatur veröffentlichten Ergebnissen validiert. In Abbildung 1 und Abbildung 2 ist der THz Versuchsaufbau dargestellt.

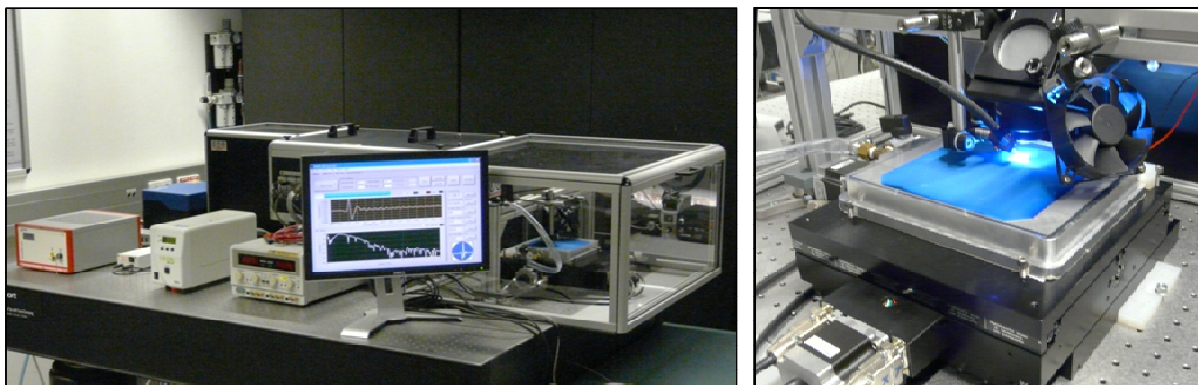


Abbildung 1: (links) THz-Versuchsaufbau bestehend aus NIR fs-Laser, THz Spektrometer, XY-Scantisch, Trockenluftreinhausung, Metall-Halid Lichtquelle und PC-System für die Datenerfassung. (rechts) XY-Scantisch mit Vakuumhalter und aufgelegtem Si Wafer. Es ist auch die über einen Lichtwellenleiter eingekoppelte optische Anregung zu sehen.

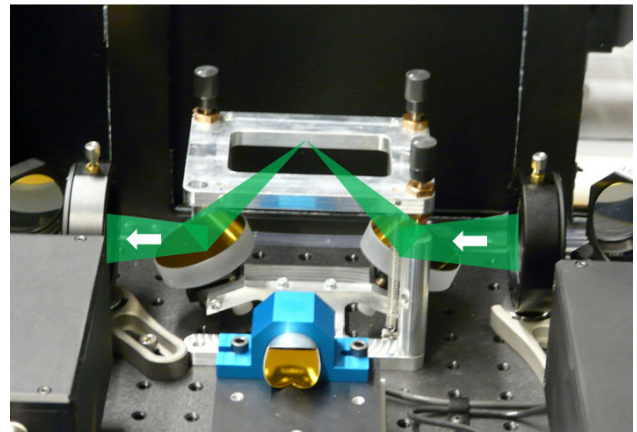
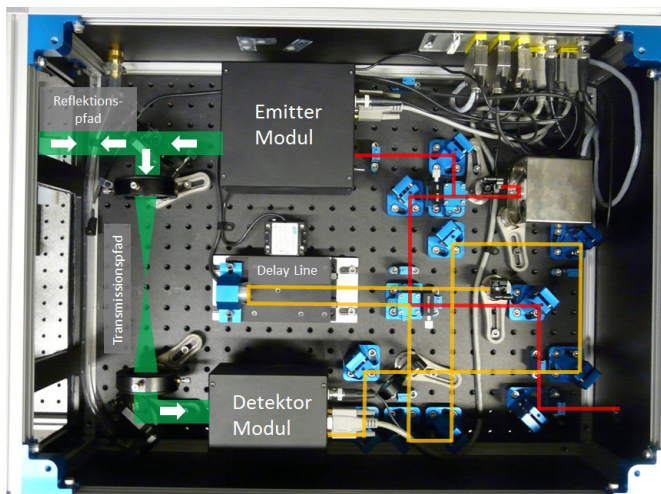


Abbildung 2: (links) THz Transmissions- und Reflektionsaufbau: rot – Pump-Laser Pfad; gelb – Probe-Laser Pfad; grün – THz Pfad. (rechts) Reflektionssetup welches einen Einfallswinkel von 45° der THz Strahlung auf der Probe ermöglicht.

2.3 THz-Spektroskopie-Messungen

Aus den Ergebnissen der theoretischen Analysen wurden unter Berücksichtigung des vorhandenen Probenmaterials THz-Spektroskopie-Experimente abgeleitet und zur Validierung herangezogen. Experimente zur Anregung von freien Ladungsträgern im Halbleitermaterial mittels einer Metall-Halid Lichtquelle wurden an doppelseitig-passivierte Silizium Wafer in Transmission und Reflektion unter durchgeführt. Die optische Anregung wurde hierfür in den Schritten 0%,12%, 25%, 50%, 100% bzw. 0, 50, 91, 166, 318 W/m² variiert. In Abbildung 3 sind die Amplitudenverläufe in Reflektion bei verschiedenen Beleuchtungsstärken dargestellt.

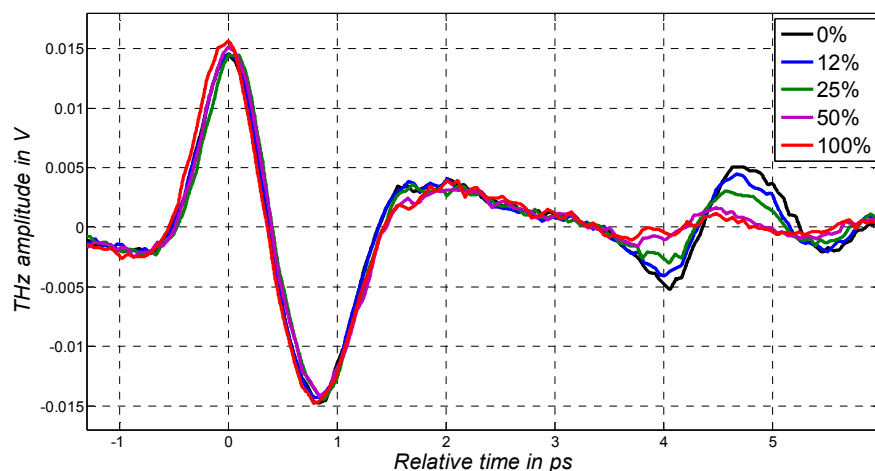


Abbildung 3: THz Amplitudenverläufe gemessen an einem doppelt passivierten Silizium Wafer, mit einer Ladungsträgerlebensdauer zwischen 38 μ s und 110 μ s, in Reflektion bei verschiedenen optischen Anregungen.

Durch die Einbringung von freien Ladungsträgern in das Halbleitermaterial erhöht sich die Dämpfung für die THz Strahlung. Aus diesem Grund sinkt die THz Amplitude mit steigender Beleuchtungsstärke bei der zweiten Reflektion (Grenzschicht Waferunterseite-Luft). Durch den höheren Anteil an freien Ladungsträgern im Halbleitermaterial steigt die Reflektivität der Oberfläche für THz Strahlung. Deshalb steigt die THz Amplitude der ersten Reflektion mit steigender Beleuchtungsstärke. Die Validierung der THz Messungen mit optischer Anregung wurden mit Hilfe der Microwave Photoconductive Decay (MWPCD) Messung durchgeführt. Messmethoden wie z.B. Elektrolumineszenz oder Thermographie konnten nicht zur Validierung der THz Messungen herangezogen werden, da die vermessenen Silizium Wafer in diesem Produktionsschritt noch über keine elektrischen Anschlüsse verfügen. In Abbildung 4 sind die MWPCD, THz Reflektivität und THz Spektroskopie Messungen für einen doppelt-passivierte Wafer mit einer Ladungsträgerlebensdauer zwischen $38\mu\text{s}$ und $110\mu\text{s}$ dargestellt.

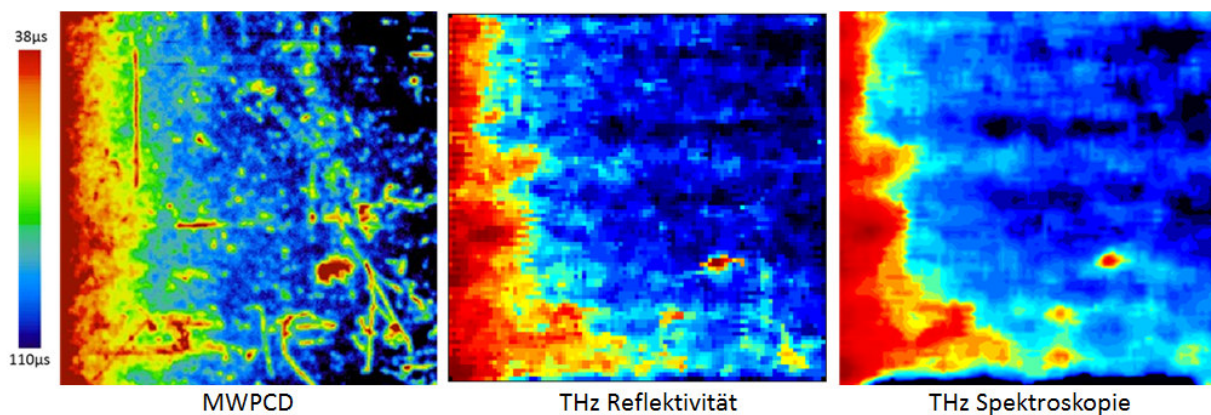


Abbildung 4: (links) Ladungsträgerlebensdauer Messung mittels MWPCD Messung für einen Silizium Wafer mit einer Ladungsträgerlebensdauer von 38 bis $110\mu\text{s}$. (mitte) Wert der maximalen Amplitude des THz Signals an der Grenzschicht Luft/Waferoberfläche. (rechts) Maximum der Amplitude des THz Frequenzspektrums desselben Si Wafers. Die roten Bereiche in den THz Messungen zeigen gute Korrelation mit Bereichen der MWPCD Messung welche niedrige Ladungsträgerlebensdauer aufweisen.

Es ist ersichtlich, dass in den THz Bildern viele der Bereiche, die im MWPCD Bild als Bereiche mit geringerer Ladungsträgerlebensdauer identifiziert wurden, auch im THz Bild ersichtlich sind. Die geringere Auflösung der THz Bilder resultiert aus dem Durchmesser des Messspots (ca. 1mm) und der Schrittweite von 1,5mm des Rasterscans.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein umfassendes Modell einer Siliziumsolarzelle entwickelt, das alle relevanten physikalischen Effekte einschließt und es so erlaubt die Dynamik der erzeugten Ladungsträger zu studieren. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich die zur Berechnung der erwarteten THz Absorption benötigten Parameter, Dichte und Gleichgewichtsverteilung der Ladungsträger, abschätzen.

2.4 THz-Tomographie-Messungen

THz-Tomographie-Messungen anhand von Proben mit einfachem Schichtaufbau, Wafern und Solarzellen, wurden durchgeführt. Es wurde der Fokus auf die Aktivitäten zur Durchführung und Validierung von Schichtdickenmessungen an Photovoltaik-Substraten gelegt. Tomographische Messungen an doppelseitig passivierten Si Wafern wurden in Reflektionsgeometrie durchgeführt. In

Abbildung 5 ist die räumliche Verteilung der Waferdicke eines Silizium Wafers mit einer vom Hersteller spezifizierten Waferdicke von $180\mu\text{m}$ dargestellt.

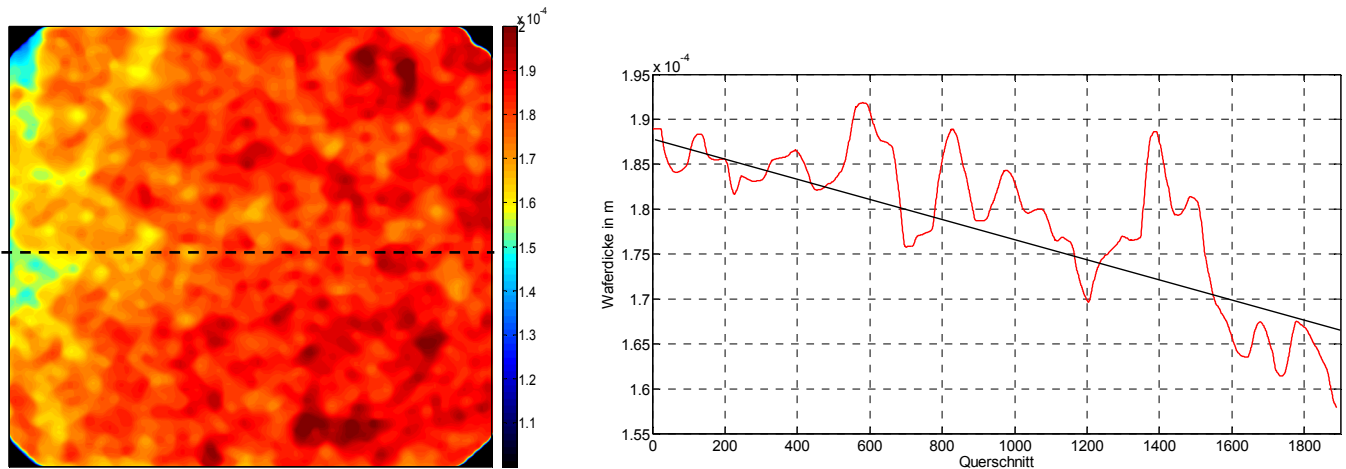


Abbildung 5: (links) Räumliche Verteilung der Waferdicke gemessen mittels THz Tomographie. Gestrichelte Linie zeigt die Position des Querschnittsprofils an. (rechts) Querschnittsprofil der Waferdicke eines Silizium Wafers welcher mit einer Dicke von $180^{+10}_{-20} \mu\text{m}$ spezifiziert ist.

2.5 THz Emissionsmikroskopie-Messungen

Ausgehend von THz-Emissionsmikroskopie-Versuchen am Ti:Saphir-Laser wurden die Randbedingungen und Möglichkeiten bezüglich Auflösungslimit ermittelt. Es wurde das Setup dahin gehend optimiert um eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen. In weiterer Folge wurde untersucht, ob eine Implementation basierend auf einem einfacheren und günstigeren Kurzpulsfaserlaser möglich ist. Die Validierung der THz Emissionsmikroskopie Messungen wurde mit Hilfe der Optical Beam Induced Current (OBIC) Methode durchgeführt (siehe Abbildung 6).

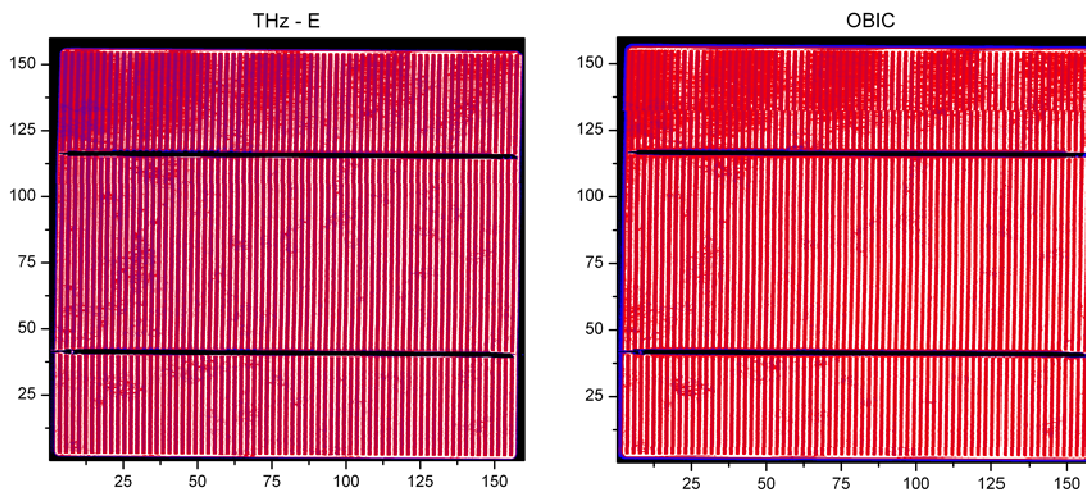


Abbildung 6: Intensitätsprofil der THz Emission (links) und des OBIC Stroms (rechts) für die gesamte kristalline Siliziumsolarzelle. Einheit sind Millimeter.

2.6 Dissemination

Erste Projektergebnisse wurden bereits in einschlägigen Fachjournalen publiziert und auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Ein Überblick über die bereits publizierten Publikationen ist im Literaturverzeichnis unter Punkt 5 zu finden.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die THz Transmissions- bzw. Reflektionstechnik ein großes Potential für die Untersuchung von Solarzellen besitzt. Die Projektergebnisse belegen, dass eine optische Bestimmung der Ladungsträgerlebensdauer und der Ladungsträgerdichte über eine THz-Messung möglich ist. Die Messergebnisse konnten über Simulationen eines optimierten Drude-Modells unter Verwendung der Materialparameter des Halbleitermaterials der verwendeten Solarzelle bestätigt werden. Die erzielbare Dynamik kann über eine zusätzliche optische Anregung noch weiter erhöht werden. Obwohl die Studien mit breitbandigen THz Pulsen durchgeführt wurden, können dieselben Ergebnisse auch mit schmalbandigen THz Quellen, z.B. mittels THz Quantenkaskadenlasern (QCL), erzielt werden. Die Verwendung von QCLs würde zu einer dramatischen Vereinfachung des Messaufbaus führen.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Untersuchung von Siliziumsolarzellen mit Hilfe der THz Emissionsmikroskopie unter den folgenden Bedingungen möglich ist: (1) Anlegen einer Sperrspannung (erfordert eine fertig prozessierte Solarzelle), und (2) die Anregungsfläche ist wesentlich größer als die typische Strukturgröße der Solarzellenoberfläche.

Weiterhin könnte die Beleuchtung der Solarzellen, die für die THz Messungen benötigt wird, gepulst und bei unterschiedlichen Wellenlängen erfolgen. Dies führt zu einer Reduktion der Wärmeentwicklung in der Solarzelle, kann örtlich begrenzt erfolgen und bietet durch die Verwendung verschiedener Wellenlängen die einzigartige Möglichkeit verschiedene Regionen des Substrates anzusprechen. Letztendlich bleibt zu erwähnen, dass die Blitzlampe, die standardmäßig für die Kontrolle der fertig prozessierten Solarzellen eingesetzt wird, auch für die hier vorgestellte Untersuchung mittels THz Strahlung verwendet werden kann.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Projektergebnisse bestätigen das große Potential der THz-Messtechnik zur Charakterisierung von PV-Materialien, insbesondere als optische Messmethode elektrischer Materialeigenschaften. In Kombination mit den etablierten Messansätzen (EL, PL, MWPCD, etc.) wird sich die THz-Messtechnik als Komplementärmessmethode, wenn auch vorerst aufgrund der Kostenkonstellation nur langsam, durchsetzen. Über alternative THz-Messansätze, z.B. voll-elektronische THz-Messung oder die Erzeugung mittels QCLs, dürfte sich jedoch auch die Kostenseite der THz-Instrumentierung in naher Zukunft verbessern. Aktuell laufen Gespräche mit österreichischen Solarzellenherstellern über mögliche technische Weiterentwicklungen bezüglich der Projektergebnisse.

Basierend auf den guten Ergebnissen mit (klassischen) Silizium-Solarzellen des aktuellen Projekts ergibt sich eine natürliche Fortsetzungsachse bezüglich der Entwicklung der THz-Messtechnik für die nächste

Generation von Solarzellen, wie z.B. flexible, organische bzw. Dünnschichttechnologien. Konkret wird bereits mit einem österreichischen Hersteller für Dünnschichtsolarzellen an einem Folgeprojektantrag im Rahmen des e!MISSION.at – Energy Mission Austria – Förderprogrammes gearbeitet.

5 Literaturverzeichnis

F. Meghdadi, R. Leitner, T. Arnold, M. De Biasio, W. Scherf, Analysis of THz Time Signals for Defect Inspection of Si Solar Cells, 9te Österreichische Photovoltaik Fachtagung, 20-21 Okt. 2011, Wien, Austria.

M. De Biasio, T. Arnold, R. Leitner, W. Muehleisen, Investigation of optically injected charge carrier dynamics with THz spectroscopy, Proc. of International THz Conference, pp.89-93, 24-25 Nov. 2011, Villach, Austria.

T. Arnold, M. De Biasio, R. Leitner, W. Muehleisen, Investigation of Silicon Solar Cell Properties with THz Spectroscopy, International Forum on Terahertz Spectroscopy and Imaging, 6-7 March 2012, Kaiserslautern, Germany.

T. Arnold, M. De Biasio, R. Leitner, W. Muehleisen, Investigation of optically injected charge carrier dynamics with THz spectroscopy, SPIE Defense, Security and Sensing, 23-27 April 2012, Baltimore, Maryland.

T. Arnold, M. De Biasio, R. Leitner, W. Muehleisen, Investigation of Charge Carrier Dynamics in Silicon Wafers using Terahertz Imaging Spectroscopy, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 13-16 May, 2012, Graz, Austria.

Im Berichtszeitraum wurden zusätzlich 12 Presseartikel in Zeitschriften und Fachmagazinen veröffentlicht.

6 Kontaktdaten

Dipl. Ing. Thomas Arnold
CTR Carinthian Tech Research AG
Europastrasse 4/1
Technologiepark Villach
A - 9524 Villach / St. Magdalen
Tel: +43 (0) 4242 56300 - 228
Fax: +43 (0) 4242 56300 – 400
Email: thomas.arnold@ctr.at
Web: <http://www.ctr.at>

Uni. Ass. Dipl.-Ing. Dr.-Tech. Juraj Darmo
Institut für Photonik
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 25-27/E387
1040 Wien
Tel.: +43 (0) 1 58801 38735
Fax: +43 (0) 1 58801 38799
Email: juraj.darmo@tuwien.ac.at
Web: thzlabs.tuwien.ac.at
www.photonik.tuwien.ac.at

IMPRESSUM

Verfasser

CTR Carinthian Tech Research AG
Europastraße 4/1
Technologiepark Villach
A - 9524 Villach / St. Magdalen
Thomas Arnold
Tel: +43 (0) 4242 56300 - 228
Fax: +43 (0) 4242 56300 - 400
E-Mail: thomas.arnold@ctr.at
Web: <http://www.ctr.at>

Institut für Photonik
Technische Universität Wien
Gusshausstrasse 25-27/E387
1040 Wien
Juraj Darmo
Tel.: +43 (0) 1 58801 38735
Fax: +43 (0) 1 58801 38799
E-Mail: juraj.darmo@tuwien.ac.at
Web: thzlabs.tuwien.ac.at
www.photonik.tuwien.ac.at

AutorInnen

Thomas Arnold
Raimund Leitner
Juraj Darmo
Karl Unterrainer

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH