

PhocoHila

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 03EE1125

Danksagung

Das Forschungsprojekt PhocoHila wurde in der Zeit vom 01.06.2022 bis zum 31.12.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1125 betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Neue Technologien GmbH und der Hochschule Mittweida gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Fraunhofer ISE im Teilprojekt 03EE1125A. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten wird ein separater Abschlussbericht von Seiten der Verbundpartner eingereicht.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PhocoHila

**PHOTONISCHE PROZESSE ZUM
SCHNELLEN PRÄZISEN UND FLEXIBLEN
HEIZEN VON
HALBLEITERBAUELEMENTEN**

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

in Freiburg

Projektleitung Dr. rer. nat. Fabian Meyer

Förderkennzeichen: 03EE1125A

Berichtszeitraum: 01.06.2022 – 31.12.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens	6
1.1 Aufgabenstellung.....	6
1.2 Voraussetzungen	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
Kristallisation und Aktivierung	7
TCO-Annealing.....	7
RTP und Ansätze für laserbasiertes Heizen	7
Photonisches Sintern und Intense Pulsed Light	8
Charakterisierung von Umwandlungsprozessen.....	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	9
AP 0 Projektkoordination	9
2.1.1 AP 1 Kristallisation von amorphen Schichten, Aktivierung und Dotierung	9
2.1.2 AP 2 Annealing von TCO-Schichten für Hocheffizienz-Solarzellen	11
Laserannealing mit Ultrakurzpulsen.....	22
IPL für TCO Annealing.....	28
2.1.3 AP 3 Charakterisierung und Modellierung von strukturellen Umwandlungsprozessen	29
Charakterisierung von Dünnschichten mittels Photolumineszenzspektroskopie.....	31
Sheet Resistance Imaging.....	33
2.1.4 AP 4 Entwicklung einer Laser-basierten RTP Anlage für direktes Wafer-Heizen und Hochtemperaturprozesse mit sehr kurzen Zyklen	36
Entwickeltes Anlagenkonzept und Umsetzung	37
2.1.5 AP 5 Photonisches Sintern, Curing und Kontakt-Optimierung.....	39
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	41
2.3 Notwendigkeit der Arbeit.....	41
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	42
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	43
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	44
Poster	44
Vorträge.....	44
Journal-Veröffentlichungen.....	44
Referenzen	45

3. Anlagen.....	46
3.1 Erfolgskontrollbericht.....	46
3.2 Berichtsblatt	46

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt „PhocoHila“ hatte das Ziel, neue photonische Prozesse für das schnelle, präzise und flexible Heizen von Halbleiterbauelementen, insbesondere für die Solarzellenfertigung, zu erforschen und zu entwickeln. Im Fokus stand die Überwindung der Limitierungen konventioneller Ofentechnologien durch den Einsatz von Lasern als Wärmequelle. Ziel war es, thermische Prozesse wie Annealing, Kristallisation, Aktivierung und Dotierung gezielt und selektiv zu gestalten, um insbesondere bei komplexen Schichtsystemen – etwa in Heterojunction- und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen – eine verbesserte Materialqualität und Energieeffizienz zu erreichen. Die Aufgabenstellung umfasste sowohl die Entwicklung und Optimierung photonischer Prozessrouten für verschiedene Materialsysteme und Schichten als auch die prototypische Umsetzung einer laserbasierten Rapid Thermal Processing (RTP)-Anlage mit Vakuumprozesskammer. Darüber hinaus sollten die physikalischen Mechanismen der Laser-Materie-Interaktion umfassend charakterisiert und verstanden werden, um die Prozessfenster optimal auf die jeweiligen Anforderungen abzustimmen und neue Bearbeitungsregime zu identifizieren

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde in einem interdisziplinären Konsortium unter Leitung des Fraunhofer ISE durchgeführt, das über umfangreiche Erfahrungen in der Entwicklung und Charakterisierung von Solarzellen und photonischen Prozessen verfügt. Zu den Voraussetzungen gehörten modern ausgestattete Labore für die Herstellung und Bearbeitung von Halbleiterwafern, verschiedene Laser- und Blitzlampensysteme (u.a. Excimer-, Festkörper- und Diodenlaser sowie IPL-Anlagen), spezialisierte Messtechnik (z.B. Raman-, Photolumineszenz- und Hall-Messungen) sowie Simulationsumgebungen zur Prozess- und Anlagenentwicklung. Die Projektpartner brachten spezifisches Know-how in den Bereichen Lasertechnologie, Prozessführung, Optik, Anlagenbau und Messtechnik ein. Die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Komponentenherstellern ermöglichte den Zugang zu neuesten Technologien und förderte den Wissenstransfer. Die Durchführung erfolgte unter Berücksichtigung der aktuellen wissenschaftlichen und technischen Standards sowie der einschlägigen Normen für Sicherheit und Qualität in der Halbleiter- und Photovoltaikfertigung

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in fünf zentrale Arbeitspakete (AP) gegliedert, die parallel über die Laufzeit von zwei Jahren bearbeitet wurden:

AP 1: Kristallisation von amorphen Schichten, Aktivierung und Dotierung

AP 2: Annealing von TCO-Schichten (transparente leitfähige Oxide) für Hocheffizienz-Solarzellen

AP 3: Charakterisierung und Modellierung von strukturellen Umwandlungsprozessen

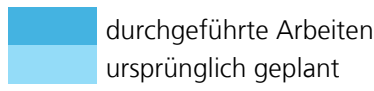
AP 4: Entwicklung einer laserbasierten RTP-Anlage für direktes Wafer-Heizen und Hochtemperaturprozesse

AP 5: Photonisches Sintern, Curing und Kontakt-Optimierung

Die Arbeitspakete umfassten jeweils die Entwicklung und Durchführung von Experimenten, Prozesssimulationen, Charakterisierungen und die Auswertung der Ergebnisse. Der Ablauf wurde mittels Gantt-Chart geplant (Tabelle 1), wobei zentrale Meilensteine wie der Nachweis der Kristallisation, die Leitfähigkeitssteigerung durch Laserannealing, die Fertigstellung der RTP-Anlage und die Demonstration photonischer Sinterprozesse definiert wurden. Die Arbeitspakete wurden durch regelmäßige Konsortialtreffen, Berichterstattung und einen kontinuierlichen Abgleich der Zwischenergebnisse koordiniert (AP0).

Tabelle 1: Geplanter und tatsächlicher Projektverlauf nach Arbeitspaketen (APs)

	2022		2023				2024			
	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP0 Koordination	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									
AP1 Kristallisation	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									
AP2 TCO Annealing	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									
AP3 Charakterisierung	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									
AP4 Entwicklung RTP	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									
AP5 Curing	[Gantt bar showing completed work from Q3 2022 to Q4 2024]									



1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt knüpfte an den aktuellen Stand der Forschung zu thermischen Prozessen in der Photovoltaik an. Neben klassischen Ofenprozessen wie Diffusion, Feuern und Aktivierung, werden in diesem Projekt in anderen Halbleiterbereichen schon erprobte, oder in Vorexperimenten vielversprechende photonische Verfahren wie Laserannealing und Intense Pulsed Light (IPL)-Verfahren übertragen. Für die Herstellung hocheffizienter Solarzellen (z.B. SHJ, TOPCon, Perowskit-Tandem) sind thermische Prozesse zur Dotierung, Kristallisation und Kontaktbildung essenziell, stoßen jedoch bei temperatursensitiven Schichtsystemen an Grenzen. Laserbasierte Annealing-Verfahren ermöglichen eine selektive, schnelle und energieeffiziente Behandlung einzelner Schichten, ohne das gesamte Bauteil thermisch zu belasten.

Kristallisation und Aktivierung

Die Laser-induzierte Kristallisation von amorphem Silizium ist ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von polykristallinem Silizium [1], [2]. Excimer-Laser-Kristallisation mit Pulsen im Nanosekundenbereich ermöglicht die kontrollierte Umwandlung von a-Si zu poly-Si, wobei die Korngrößenabhängigkeit von der Wärmekapazität und -leitfähigkeit des Substrats bestimmt wird. Die Kristallisationsdicke hängt von der verfügbaren Energie oberhalb der Schmelzschwelle ab. Dotanten-Aktivierung in amorphem Silizium wird durch die Laser-induzierte Schmelz- und Erstarrungszyklen erreicht. Die Aktivierungstiefe korreliert dabei direkt mit der Schmelztiefe und kann durch Anpassung der Laserparameter kontrolliert werden.

TCO-Annealing

Das TCO-Annealing stellt einen zentralen Prozess zur Optimierung der elektrischen und optischen Eigenschaften transparenter leitfähiger Oxide dar [3]. Konventionelle thermische Annealing-Verfahren erfordern typischerweise Temperaturen von 300-500°C für die optimale Kristallisation von ITO und AZO-Schichten. Bei ITO führt thermisches Annealing bei optimalen Bedingungen zu einer starken Reduzierung des Schichtwiderstandes. AZO-Filme benötigen ähnlich hohe Temperaturen von 400-500°C für beste elektrische Eigenschaften, wobei der Widerstand um einen Faktor 10-100 reduziert werden kann.

RTP und Ansätze für laserbasiertes Heizen

Rapid Thermal Processing (RTP) nutzt hochintensive Lampen zur schnellen Wafererwärmung mit charakteristischen Aufheizraten und kurzen Prozesszeiten [4]. Die Technologie ermöglicht präzise Temperaturkontrolle und gute Gaskontrolle, was komplexe mehrstufige Prozesse innerhalb einer

Behandlung ermöglicht. RTP findet breite Anwendung in der Dotantenaktivierung, thermischen Oxidation und Kontaktbildung.

Laserbasiertes Heizen bietet eine direkte Energieeinbringung mit der Möglichkeit zur Erzeugung kontrollierter Temperaturgradienten. Kontinuierliche Lasersysteme können stationäre Temperaturprofile in Proben induzieren, wobei der Annealing-Prozess aus Aufheiz- und Haltephasen besteht. Die Energieeffizienz von Laser-Annealing übertrifft konventionelle Verfahren deutlich durch die direkte und lokalisierte Energieübertragung.

Photonisches Sintern und Intense Pulsed Light

Photonisches Sintern oder Intense Pulsed Light (IPL) ermöglicht die Verschmelzung oder Aktivierung funktionellen Dünnschichten oder Leiterbahnen [5], [6]. Die Technologie nutzt breitbandige Lichtpulse zur selektiven Oberflächenerwärmung und vergleichsweise geringer Substratschädigung.

Millisekunden-Annealing mit Blitzlampen bei hohen Temperaturen für sehr kurze Zeiten ist ausreichend für effektive Dopant-Aktivierung und Rekristallisation. Diese ultraschnellen Prozesse minimieren unerwünschte Diffusionseffekte und ermöglichen eine präzise Kontrolle der Materialmodifikation. Rapid Thermal Annealing (RTA) zeigt deutlich beschleunigte Annealing-Raten gegenüber konventioneller Ofenbehandlung. Flash-Lamp-Annealing (FLA) erreicht Energiedichten im Joule/cm²-Bereich mit Pulsdauern von Mikrosekunden bis Millisekunden. Für Perowskit-Solarzellen ermöglicht IPL-Annealing kurze Prozesszeiten mit wettbewerbsfähigen Effizienzen.

Charakterisierung von Umwandlungsprozessen

Raman-Spektroskopie dient als zentrale Charakterisierungsmethode für Kristallisations- und Annealing-Prozesse [7], [8]. Die Intensität charakteristischer Peaks zeigt die zunehmende Kristallinität unter Laserbehandlung. Raman-Mapping ermöglicht präzise Analyse von lokalen Gradienten mit hoher räumlicher Auflösung. Photolumineszenz (PL)-Charakterisierung bietet Einblicke in elektronische Eigenschaften und Defektstrukturen. Spektroskopische Ellipsometrie ermöglicht die präzise Bestimmung von Schichtdicken und optischen Konstanten, erfordert allerdings bei komplexen Schichtsystemen eine gute Modellierung.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde als Verbundvorhaben durchgeführt. Die Partner brachten Kompetenzen in den Bereichen Lasertechnologie, Optik, Anlagenbau, Prozessierung und Messtechnik ein. Die Zusammenarbeit erfolgte durch gemeinsame Entwicklung und Nutzung von Versuchsanlagen, Austausch von Proben und Messergebnissen sowie durch regelmäßige Abstimmungstreffen. Das **Fraunhofer ISE** übernahm hierbei Koordination, Probenherstellung, Prozess- und Anlagenentwicklung und Charakterisierung. Die Proben wurden zum Teil in den eigenen Laboren, zum Teil bei Partnern in den Applikationslaboren, vor allem von **Coherent** und **Innovaent** in Göttingen bearbeitet. Außerdem wurde auf ein Lasersystem in einem Labor der **Universität Freiburg** zurückgegriffen. Weitere assoziierte Partner, **Centrotherm**, **Novacentrix**, **Trumpf**, **Dausinger + Giesen**, **Topag Lasertechnik** und **WiTec** unterstützten durch Bereitstellung von Komponenten, Know-how und teilweise durch Zufinanzierung. Die Aufgabenverteilung erfolgte entlang der jeweiligen Arbeitspakete und wurde durch den Kooperationsvertrag geregelt. Durch das breite Konsortium konnte ein außergewöhnlich großes Spektrum an photonischen Prozessen an einer ebenfalls sehr breiten Auswahl an Proben durchgeführt werden.

Fraunhofer ISE und Neue Technologien GmbH (NTG) haben eng bei der Entwicklung eines neuartigen Laser-RTP zusammengearbeitet. Am ISE wurden hierzu Simulationen für die Auslegung eines vakuumfähigen Fensters zur Einbringung der Laserstrahlung durchgeführt, während bei NTG eine Vakuumkammer für die Laserbearbeitung von großen Wafern und in-situ Pyrometrie entwickelt wurde. Eine solche Vakuumkammer konnte schließlich von Fraunhofer ISE beschafft werden und mit der Unterstützung von NTG im neuentwickelten RTP eingesetzt werden, um damit Heizprozesse unter extremen Bedingungen zu realisieren.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Im Projekt ist es gelungen, die im Konsortium vorhandene breite Kompetenz zum photonischen, thermischen Behandeln verschiedener Materialien zu nutzen und so die Vorteile und spezifischen Herausforderungen dieser Technologien gesamtheitlich zu betrachten. In Tabelle 2 ist eine Übersicht über die vielfältigen Gegenstände der Forschung dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über verwendete Materialien, Strahlquellen und Messmethoden im Projekt

Materialien	Strahlquellen	Messmethoden
<ul style="list-style-type: none"> • Transparente leitfähige Oxide TCOs • ITO • IFO • AZO • Halbleiter • Amorphes Silicium, a-Si:H • Monokristallines Silicium • Perowskite • Silicium-Carbid • Metalle 	<ul style="list-style-type: none"> • Excimerlaser • KrF 248nm • XeCl 308nm • Festkörperlaser • Nanosekundenquellen 343nm • Picosekundenquellen 355nm • Femtosekundenquelle 343nm und 1030nm • Laserdiodenarray • Xenon-Blitzlampe 	<ul style="list-style-type: none"> • Hochauflösende Photolumineszenz-Spektroskopie • Raman-Spektroskopie • Sheet Resistance Imaging • 4-Point-Probe • Hall-Messungen • Spektrale Ellipsometrie • UV-VIS Transmissions- und Reflektionsmessungen • Röntgendiffraktometrie XRD • Rasterelektronenmikroskopie

AP 0 Projektkoordination

Das Fraunhofer ISE übernahm die Koordination der Projekttreffen, zu denen alle Projektpartner eingeladen wurden:

- Kick-Off-Treffen 14.7.2022 Freiburg / online
- Halbjahrestreffen 7.2.2023 Freiburg
- Halbjahrestreffen 6.7.2023 online
- Halbjahrestreffen 6.11.2023 Mittweida
- Halbjahrestreffen 4.7.2024 online
- Abschlusstreffen 26.11.2024 Freiburg / online

Darüber hinaus fanden zahlreiche interne und bilaterale Treffen mit Projektpartnern statt.

2.1.1 AP 1 Kristallisation von amorphen Schichten, Aktivierung und Dotierung

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M1.1 Nachweis Si Kristallisation, sowie Leitfähigkeitsverbesserung und Lebensdauererhöhung durch Excimer-Laseranneal (ELA)	Kristallisation konnte nachgewiesen werden.	M30	Aufgrund von Proben- und Anlagenverfügbarkeit wurden Si-Kristallisationsversuche verschoben und TCO-Annealing-Versuche vorgezogen (geplant war M6)
M1.2 Nachweis Si Kristallisation, sowie Leitfähigkeitsverbesserung und Lebensdauererhöhung durch Festkörperlaser-Anneal (SLA)	Kristallisation konnte nachgewiesen werden, allerdings konnte kein schadensarmer Prozess umgesetzt werden	Nicht erreicht	Versuche konnten aus Zeit- und Anlagenverfügbarkeitsgründen nicht im Projektzeitraum durchgeführt werden
M1.3 Abschließende Bewertung der Si	Kristallisation konnte nachgewiesen werden,	M30	S.o. (geplant war M24)

Kristallisation durch UKP Laser	allerdings konnte kein schadensarmer Prozess umgesetzt werden		
---------------------------------	---	--	--

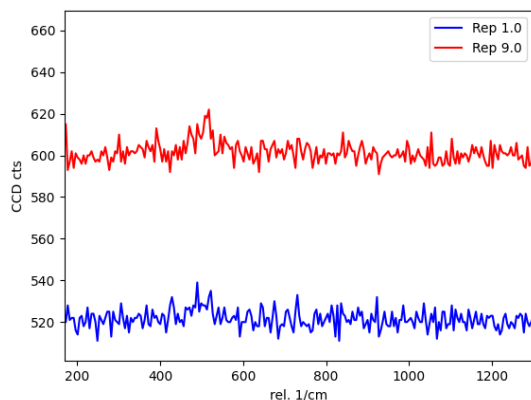
Im Laufe des Projekts wurden mehrere Anwendungsmöglichkeiten von Laserbasierter Kristallisation identifiziert.

Perowskit/Silizium Tandemsolarzellen sind eine vielversprechende Technologie, um die Effizienzbegrenzung von konventionellen Silizium-Einzelübergang (SJ) Solarzellen zu übertreffen. Während der Markt für SJ-Solarzellen heute von der TOPCon-Technologie dominiert wird, wird die meiste Forschung zu Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen an Silizium-Heteroübergangs-(SHJ)-Solarzellen (BSC) durchgeführt. SHJ-Solarzellen werden natürlicherweise mit einem transparenten leitenden Oxid (TCO) fertiggestellt, das gut als Rekombinationsschicht in Tandemgeräten geeignet ist. Bei der Verwendung von TOPCon als BSC-Technologie ist jedoch die Frage nach der idealen Rekombinationsschicht noch zu beantworten. Ein interessanter Kandidat ist der polykristalline Tunnelübergang bzw. die polykristalline Tunneljunction (TJ), der zwischen dem n-TOPCon und einer zusätzlichen p-dotierten polykristallinen Siliziumschicht gebildet wird. Er verspricht eine schlanke Prozessintegration ohne zusätzliches Sputterwerkzeug und enthält im Gegensatz zu etablierten TCOs (ITO, IZO) keine seltenen Materialien wie Indium. Die größte Herausforderung bei der Verarbeitung der polykristallinen TJ ist die Aktivierung der Dotierstoffe ohne Interdiffusion und somit ohne Verbreiterung oder Überkompensation des pn-Übergangs. Dies macht den Einsatz eines Lasers zur Aktivierung der Dotierstoffe besonders interessant, was in dem vorgestellten Experiment untersucht wurde.

Es wurden n-dotierte FZ-Wafer mit einer Dicke von 200 μm und einem Grundwiderstand von 1 Ωcm verwendet. Nach einem thermischen Annealing bei 1100 $^{\circ}\text{C}$, um Bulk-Defekte während späterer thermischer Prozesse zu verhindern, und einer RCA-Reinigung wurde auf beiden Seiten eine dünne thermische Oxidschicht gewachsen. Anschließend wurden n-dotierte amorphe Siliziumschichten mit einer Dicke von 50 nm in-situ mit PECVD abgeschieden. Auf einer Seite der Probe wird eine zweite a-Si-Schicht mit in-situ p-Dotierung abgeschieden, um die TJ zu bilden. Die Laseraktivierung erfolgte mittels Excimer-Laser bei 248 nm und einer Pulsdauer von 20 ns. Anschließend wurde die mikrostrukturelle Veränderung mittels Raman Messungen analysiert.

In Abbildung 1 sind die Raman Spektren von a-Si Proben nach Laserbearbeitung bei einer Fluenz von 200 mJ/cm^2 bzw. 350 mJ/cm^2 mit je 1 und 9 Pulsen dargestellt. Bei 200 mJ/cm^2 zeigt sich durch den laserprozess bei 9 Pulsen eine leichte Ausbildung des kristallinen Silizium-Peaks. Bei 350 mJ/cm^2 ist dieser Peak bereits deutlich stärker. Bei nur einem Puls ist hier keine strukturelle Veränderung und somit Kristallisation der a-Si Schicht messbar. Diese Ergebnisse sind für die Anwendung bereits sehr vielversprechend, es sind allerdings weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Eignung innerhalb eines Zellherstellungsverfahrens zu validieren.

200 mJ/cm^2



350 mJ/cm^2

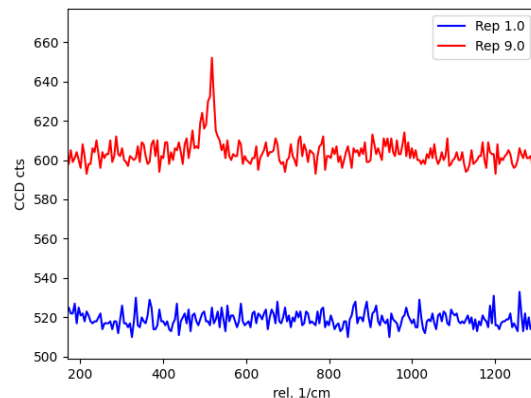


Abbildung 1: Raman-Spektren von laserbearbeiteten a-Si Proben mit Laserprozessen bei $\lambda = 248 \text{ nm}$ $t_p = 20 \text{ ns}$ mit je 1 und 9 Pulsen.

Neben der Kristallisation von amorphen Siliciumschichten, ist auch die komplexe Kristallisation von Perowskitschichten mittels photonischer Prozesse innerhalb des Projekts in den Fokus gerückt. Erste Experimente sind äußerst vielversprechend und sollen in zukünftigen Projekten ausgeweitet werden.

2.1.2 AP 2 Annealing von TCO-Schichten für Hocheffizienz-Solarzellen

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M2.1 Nachweis einer ausreichend erhöhten Leitfähigkeit der TCO durch ELA ($R_{\text{sheet}} < 400 \text{ Ohm/sq}$ für typische Dicken)	R_{sheet} -Reduktion mittels ELA (248 nm) von 2000 Ohm/sq auf 100 Ohm/sq unter Verwendung von Multipuls Prozessen für ITO Dünnschichten (75 nm)	M6	Zeitplan eingehalten
M2.2 Nachweis einer ausreichend erhöhten Leitfähigkeit der TCO durch SSLA ($R_{\text{sheet}} < 400 \text{ Ohm/sq}$ für typische Dicken)	R_{sheet} Reduktion mittels Ultrakurzpuls Laser. Untersuchung von IR und UV sowie verschiedenen Pulsdauern	M12	Zeitplan eingehalten
M2.3 Abschließende Evaluation von Flash Lamp Annealing / IPL für TCO-Schichten für PV-Anwendungen	Schichtwiderstandsreduktion mit Xenon Blitzlampe (Anlage Pulse Forge 1300) Variation von Pulsdauer, Pulsanzahl, Spannung	M12	Geplant M12
M2.4 Abschließende Evaluation von Laser-Annealing für neuartige TCO-Schichten wie zB. NiOX	Annealing von Indium-freiem Aluminium-dotiertem Zink-Oxid	M12	Experimente wurden vorzeitig durchgeführt und Meilenstein vorzeitig erreicht (geplant M24)

Transparente leitfähige Oxide (englisch: transparent conductive oxides, TCO) werden in verschiedenen Niedertemperatur-Solarzellenkonzepten als leitfähige Antireflexbeschichtungen eingesetzt. Sie vereinen gute optische Eigenschaften mit elektrischer Leitfähigkeit und ermöglichen so den Abtransport des in der Zelle generierten Stroms zu den Kontakten. Mit der zunehmenden Verbreitung von Niedertemperatur-Solarzellen stoßen klassische thermische Annealing-Prozesse jedoch an ihre Grenzen, da eine gleichmäßige Erhitzung des gesamten Zellsubstrats problematisch wird. In diesem Arbeitspaket wurde daher das **Laser-Annealing** als alternative Methode zu Ofen- oder Heizplattenprozessen untersucht. Aufgrund der kurzen Pulsdauer und der oberflächennahen Absorption bietet dieser Ansatz das Potenzial, die thermische Belastung des Substrats deutlich zu reduzieren.

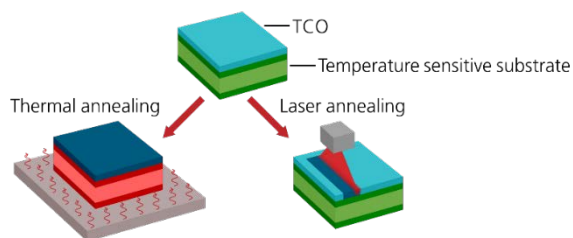


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Wärmeeinwirkung selektiver thermischer Laserprozesse, im Vergleich zum Hotplate-Referenzprozess.

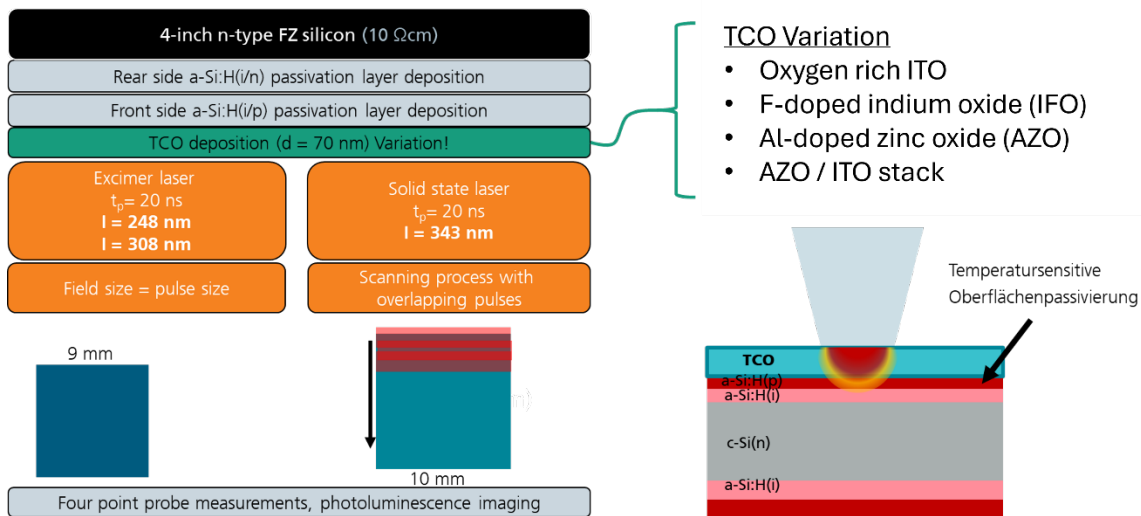


Abbildung 3 Versuchsplan zur Qualifizierung verschiedener Laserprozesse zum TCO-Annealing

Verschiedene Experimente zur Steigerung der Leitfähigkeit und Transparenz von leitfähigen Oxidschichten (TCOs) wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt. Die verwendeten temperatursensitive Substrate basierten auf der typischen Silizium-Heterojunction Solarzellenarchitektur. Dazu wurden polierte n-Typ Floatzone Silizium Wafer mit einem Dünnschichtsystem aus intrinsischem und p-dotiertem amorphem Silizium (a-Si:H (i/p)) beschichtet, auf denen dann das zu annealende TCO abgeschieden wurde. Dabei dient die a-Si:H(i/p) Schicht als Oberflächenpassivierung des Wafers und damit als Indikator für eine laserinduzierte Schädigung durch den Laserprozess. Solche a-Si:H Schichten sind temperaturempfindlich und beginnen durch Wasserstoff-Effusion bei thermischen Prozessen über 200°C zu degradieren. Im Laufe des Projektes wurden verschiedene TCOs verwendet um den Effekt des Annealings auf verschiedene Materialien zu untersuchen. In Tabelle 3 sind die verwendeten TCOs dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über verwendete TCOs im Rahmen der Laser-Annealing Experimente.

TCO	Zusammensetzung	Dicke	Info
ITO	Sauerstoffreiches Zinn-dotiertes Indium Oxid	75 nm	polykristallin Sehr hochresitives TCO durch den hohen Sauerstoffgehalt. Dieses „Proof of Principle“ TCO wurde für die ersten Versuche gewählt um einen starken Annealing Potential zu gewährleisten
IFO	Fluor und Wasserstoff dotiertes Indium Oxid	100 nm	Amorph Ist durch seine besonders hohe Ladungsträgermobilität von hohem Interesse für die Photovoltaik
AZO	Aluminium dotiertes Indium Oxid	75 nm	Polykristallin Indiumfreies TCO und damit für die Industrialisierung und großskalige Produktion eine Alternative zu Indiumbasierten TCOs

Für die meisten Versuche wurden die Proben vor Laserbearbeitung mittels Photolumineszenz-Imaging und 4-Spitzenmessung charakterisiert um Schichtwiderstand des TCOs und Lebensdauer bzw. die implizite offene Klemmspannung (iV_{oc}) im Ausgangszustand zu bestimmen.

Die genutzten Charakterisierungsmethoden sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Verwendete Charakterisierungsmethoden für die Experimente zum Laser Annealing von TCOs. Auf die letzten vier, blau markierten, Messmethoden wird in Kapitel 2.1.3 genauer eingegangen.

4pp / Hall Messungen	Schichtwiderstand R_{sheet} , Ladungsträgermobilität μ , Ladungsträgerkonzentration N
Spektrale Ellipsometrie	Brechungsindex des TCOs: $n(\lambda), k(\lambda)$
UVVis Spektroskopie	Spektral aufgelöste Reflexion, Transmission und Absorption
Röntgendiffraktometrie (XRD)	Mikrostruktur / Kristallinität des TCOs
Raman Spektroskopie	Mikrostruktur, chemische Bindungen
UV-angeregte Photolumineszenz	Defekte, Bandlückenenergie des TCOs
Photolumineszenz	Implied offene Klemmspannung → Schaden an der Solarzelle
Sheet resistance imaging	Bildgebendes schnelles Verfahren für qualitative Ladungsträgerkonzentration

Zu Anfang des Projektes wurden erste Vorversuche zum Annealing von ITO Dünnschichten auf Silizium-Heterojunction Solarzellensubstraten mit einem KrF Excimer Laser (248 nm) durchgeführt. Dabei wurden Fluenz und Puls wiederholungen variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt und zeigen, dass bereits eine starke Schichtwiderstandsreduktion von 2000 Ω/sq auf 100 Ω/sq erreicht werden konnte. Dies ist niedriger als die beste Hotplate-annealte Probe (bei 250°C für 10 min annealt), die zu Referenzzwecken angefertigt wurde.

Bei den ELA-bearbeiteten Proben fällt auf, dass der Annealing Effekt kumulativ ist, also mit steigender Pulsanzahl ein immer niedriger werdender Schichtwiderstand gemessen wird. Für niedrigere Fluenzen werden mehr Pulse benötigt, um denselben Schichtwiderstand zu erreichen als für höhere Fluenzen. Bei höheren Fluenzen wird ein Sättigungseffekt beobachtet: Ab einer bestimmten Pulanzahl führen weitere Pulse nicht zu einer zusätzlichen Verringerung. Das TCO ist „vollständig annealt“, es wird aber mit „Überannealing“ auch kein Degradationseffekt beobachtet, der sich auf den Schichtwiderstand auswirkt.

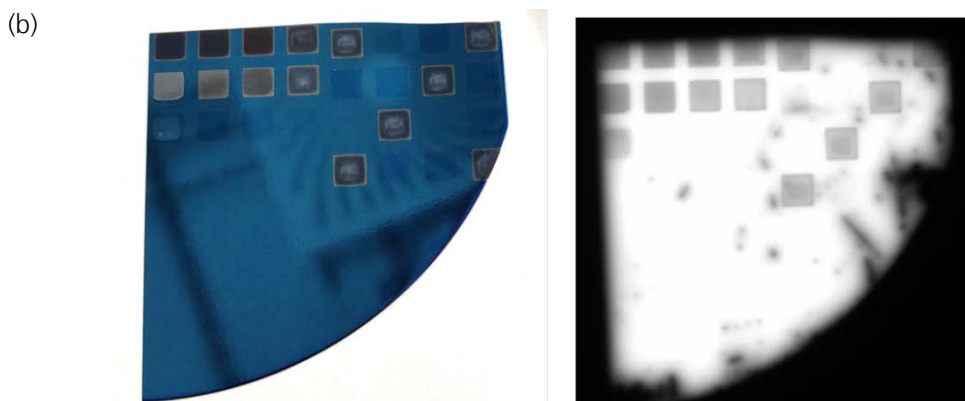
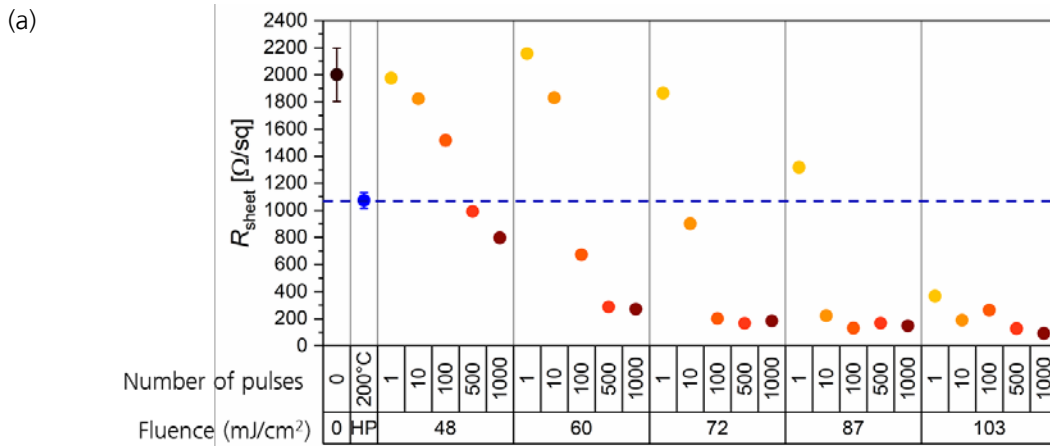


Abbildung 4: (a) Schichtwiderstandsmessungen auf den verschiedenen Laser-annealten Feldern, sowie auf einer Hotplate annealten Probe. (b) Foto des Excimer-Laser prozessierten Wafers (links) sowie ein PL Bild, auf dem ablatierte Stellen deutlich als stark reduziertes PL Signal sichtbar sind.

Auf Proben mit den verschiedenen TCOs (siehe Tabelle 3) wurden UV Nanosekunden Annealing Experimente bei den beiden Projektpartnern Coherent (Excimer Laser 248 nm und 308 nm) und Innovant (Festkörperlaser 343 nm) durchgeführt. Die eingesetzten Lasersysteme zeichnen sich durch hohe Pulsenergien aus, wodurch sich großflächige, homogene Bestrahlungsprofile (z. B. Top-Hat-Profile) realisieren lassen. Die Ergebnisse für die drei verschiedenen TCOs, ITO, IFO, AZO sowie einem Schichtsystem aus AZO mit ITO-Deckschicht, sind in Abbildung 5 gezeigt. Dabei zeigen sich vergleichbare Schichtwiderstandsreduktionen für alle drei Wellenlängen. Für das ITO werden mittels Laserannealing niedrigere Schichtwiderstände erreicht als für den thermischen Prozess. Im Gegensatz dazu sind die erzielten Schichtwiderstände für die amorphe IFO Schicht höher als bei dem Referenzprozess. Auf diese Unterschiede wird im Folgenden detaillierter eingegangen. Am Vergleich dieser beiden Schichten wurde die starke Abhängigkeit der Annealing-Mechanismen von den TCO-Eigenschaften direkt nach Abscheidung untersucht und demonstriert.

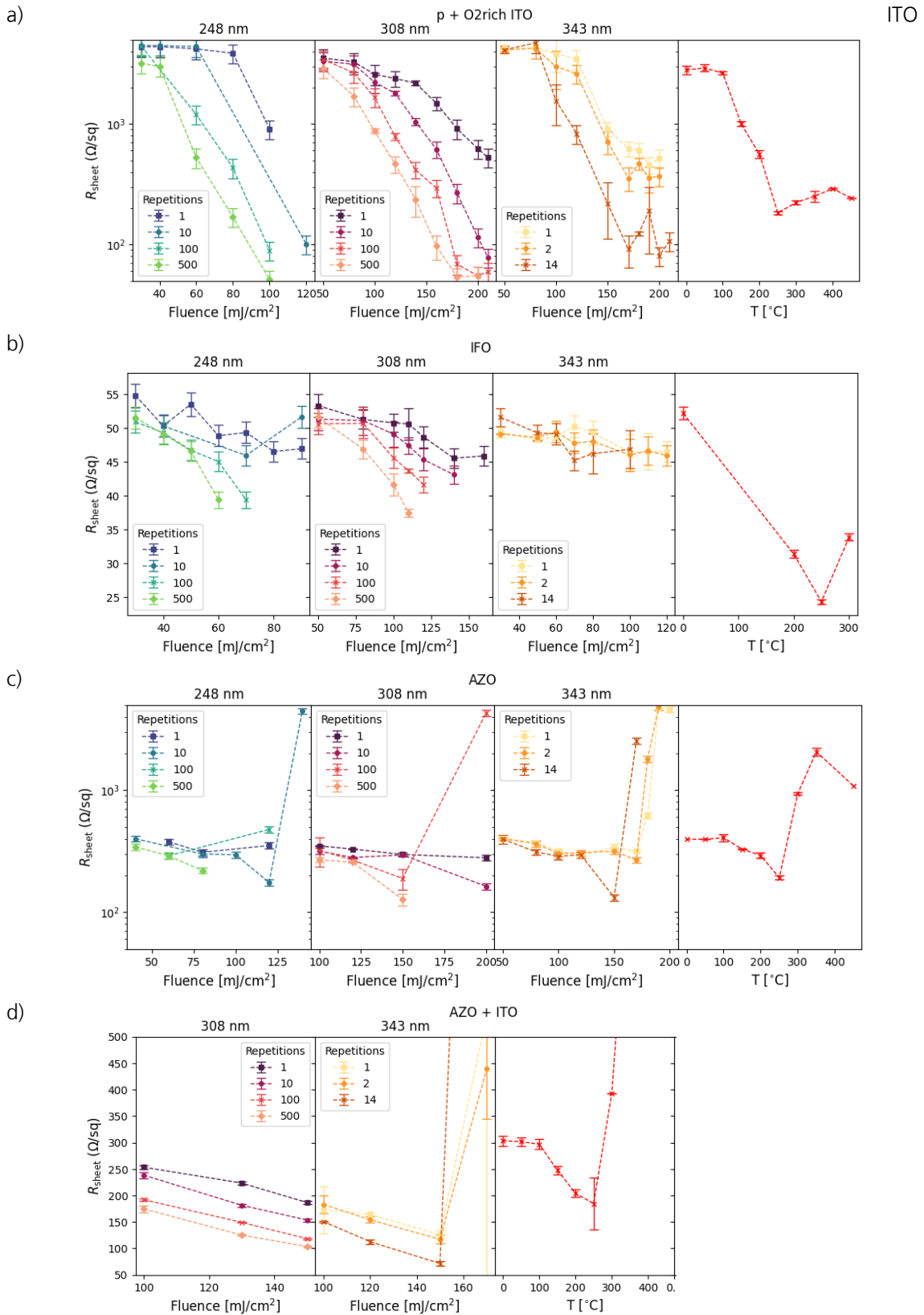


Abbildung 5: Schichtwiderstandsmessungen für a) ITO, b) IFO, c) AZO und d) AZO / ITO Schichtsystem nach Laser annealing bei verschiedenen Wellenlängen. In rot ist der Schichtwiderstand nach Hotplate-Annealing bei verschiedenen Temperaturen gezeigt.

Mit der AZO-Schicht (in d) wurde auch eine indiumfreie TCO-Alternative untersucht. Obwohl AZO für Degradation an Luft bekannt ist konnte eine signifikante Reduktion der Schichtwiderstände durch Laser Annealing an Luft demonstriert werden. Allerdings ist eine starke Degradation für höhere Fluenzen und für den Hotplate-Prozess bei Temperaturen über 250°C sichtbar. Um das AZO vor Degradation zu schützen wurde ein weiterer Probentyp mit einer AZO Dünnschicht mit ITO „Capping“-Schicht hergestellt. Allerdings zeigen sich hier keine signifikanten Vorteile. Ähnlich wie bei den AZO Schichten findet mit steigender Fluenz bzw Hotplate-Temperatur eine Schichtwiderstandsreduktion statt. Bei höheren Fluenzen und Temperaturen Degradation, verbunden mit einem starken Schichtwiderstandsanstieg. Bei allen TCOs zeigt sich eine signifikante Reduktion der Schichtwiderstände unabhängig von der verwendeten Wellenlänge der Laser. Somit können auch die perspektivisch kosteneffizienteren, langwelligeren Laserquellen zielführend für das TCO Annealing eingesetzt werden.

Um die Auswirkung des Laserannealings auf die Lebensdauer der Solarzelle zu untersuchen, wurden Photolumineszenzbilder aufgenommen und iV_{OC} Werte berechnet. In Abbildung 6 sind die iV_{OC} Werte in Abhängigkeit von den erreichten Schichtwiderständen aufgetragen. Es zeigt sich, dass starke Schichtwiderstandsreduktionen für alle drei Wellenlängen ohne signifikante Schädigung der Solarzellensubstrate erreicht werden können.

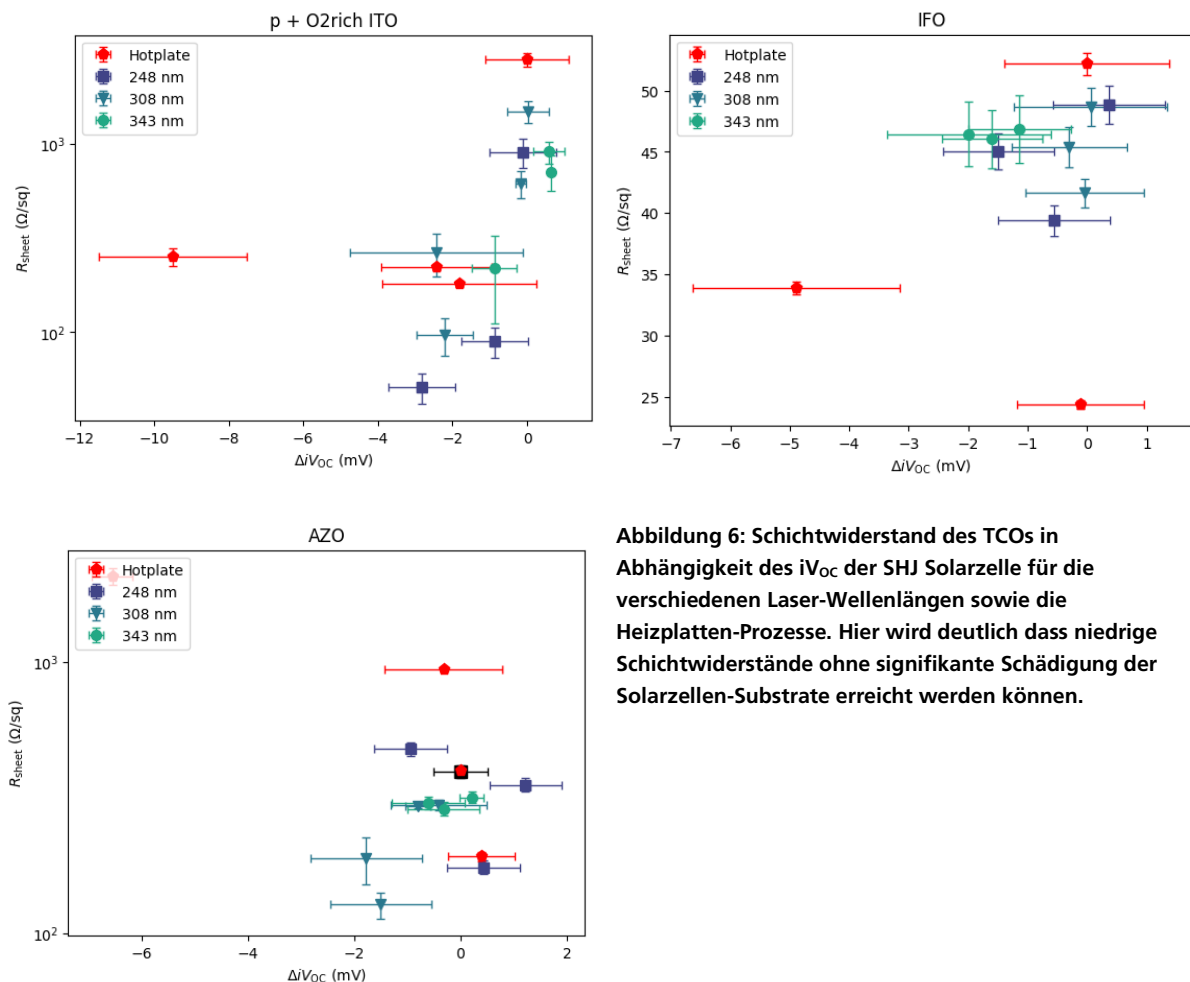


Abbildung 6: Schichtwiderstand des TCOs in Abhängigkeit des iV_{OC} der SHJ Solarzelle für die verschiedenen Laser-Wellenlängen sowie die Heizplatten-Prozesse. Hier wird deutlich dass niedrige Schichtwiderstände ohne signifikante Schädigung der Solarzellen-Substrate erreicht werden können.

Abbildung 7 zeigt a) XRD und b) Hall Messungen für die beiden TCOs, nachdem die Proben bei verschiedenen Temperaturen auf der Heizplatte geheizt wurden. Für das sauerstoffreiche ITO, das schon bei Abscheidung polykristallin ist, zeigt sich keine Änderung des (222) Peaks im Diffraktogramm, was auf eine unveränderte Kristallinität hindeutet. Die Hall Messungen zeigen eine starke Reduktion im Schichtwiderstand mit steigender Temperatur, wobei das Minimum bei 250°C erreicht wird. Die Messung

zeigt, dass dies durch einen starken Anstieg der Ladungsträgerkonzentration N erreicht wird während sich die Mobilität μ wenig ändert. Dies korreliert mit den XRD Daten: Eine Änderung der Kristallinität würde vor allem eine Mobilitätsänderung mit sich bringen. Der Anstieg von N wird einer Effusion von Sauerstoff aus der sehr sauerstoffreichen Schicht zugesprochen was Sauerstoff-Fehlstellen im Kristall erzeugt, die als Dotanten im ITO agieren.

Für die IFO Schicht zeigt sich im XRD für die nicht geheizte Schicht kein Kristallpeak, die Schicht ist also amorph. Durch Heizen bildet sich mit steigender Temperatur der (222)-Peak aus was mit einem starken Anstieg der Ladungsträgermobilität verbunden ist. Die Ladungsträgerkonzentration fällt dagegen leicht ab. Der minimale Schichtwiderstand, wieder bei 250°C, wird also vor allem durch die Kristallisierung und damit verbesserte Mobilität bewirkt. Dieses Experiment zeigt, dass die Annealing-Mechanismen abhängig vom TCO Typ sehr unterschiedlich sein können.

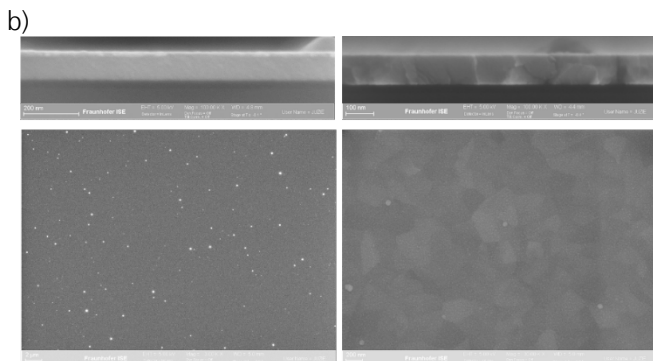
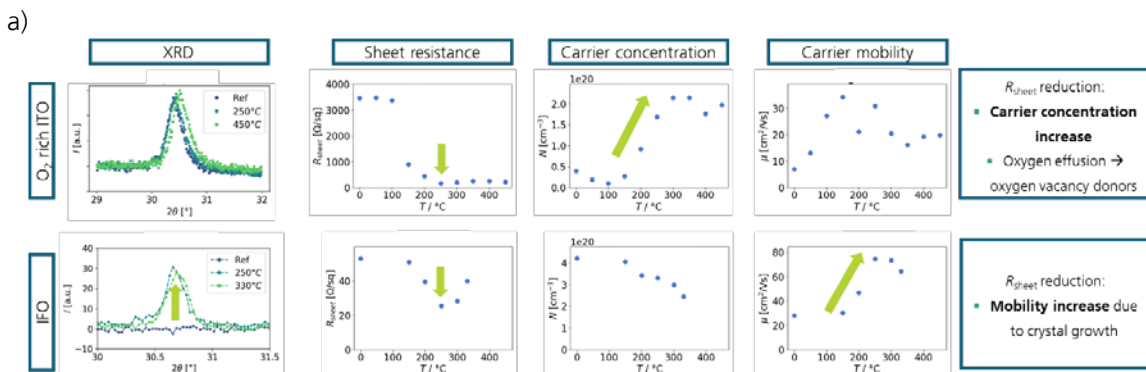


Abbildung 7: a) XRD Diffraktogramm des für In_2O_3 typischen (222) Kristall-Peaks sowie Hall Messungen für die ITO und IFO Dünnschicht nach Hotplate-Annealen bei verschiedenen Temperaturen. b) Probenquerschnitt und Aufsicht im REM von der IFO Schicht vor und nach Hotplate-Annealing.

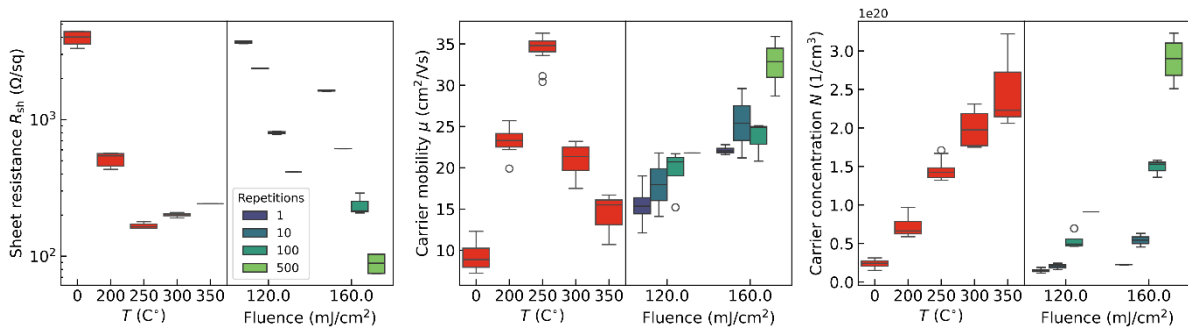
Dies hat auch Auswirkungen auf das Laser-Annealen wie die Ergebnisse der Hall Messungen in Abbildung 8 zeigen. Der Schichtwiderstand für das ITO (siehe a)) erreicht durch Laser-Annealing deutlich niedrigere Werte als der beste Heizplatten-Prozess. Für das IFO (siehe b)) kann der minimale Schichtwiderstand für keinen der im Experiment verwendeten Laserprozesse erreicht werden. Die REM Aufnahmen in Abbildung 9 zeigen, dass nur die obere Hälfte der Schicht kristallisiert werden konnte. Mit steigender Pulsanzahl wird der kristallisierte Anteil höher. Dieses Ergebnis wird unterstützt durch die XRD Messungen in Abbildung 10. Erst bei hoher Pulsanzahl wird eine signifikante Kristallinität für das IFO gemessen. Diese unvollständig annealte Schicht hat einen entsprechend höheren Schichtwiderstand als die vollständig durch die Heizplatte annealte Schicht. Der Phasenübergang von amorph zu kristallin scheint eine längere Wärmeeinwirkung vorauszusetzen, um die benötigte Aktivierungsenergie einzubringen. Eventuell müssen lokal höhere Temperaturen erreicht und gehalten werden um eine Kristallisation zu ermöglichen, was durch die untersuchten Laserprozesse nur oberflächennah passiert. Durch Multipulsprozesse wird die Dauer der Wärmeeinwirkung erhöht. Für das ITO in Abbildung 10 a) zeigt sich im XRD keine erhöhte Kristallinität, jedoch eine ausgeprägtere Peak-Asymmetrie bei hoher Pulsanzahl. Dies weist ebenfalls auf Temperaturgradienten hin, die zu lokalen strukturellen Umordnungen oder thermischen Spannungen führen können.

Solche Gradienten können für spezifische Anwendungen vorteilhaft sein, da sie es ermöglichen, Oberflächeneffekte wie Passivierung und Kontaktwiderstand von den optoelektronischen Eigenschaften des Volumenmaterials zu entkoppeln. Darüber hinaus könnte die kurze Dauer der durch die Laserpulse

erzeugten erhöhten Temperatur vorteilhaft sein, da Abbaumechanismen weniger Zeit haben, sich auszuwirken.

Da TCOs zunehmend in moderne, niedertemperaturverarbeitete optoelektronische und photovoltaische Bauelemente integriert werden, ist ein klarer Trend zur Reduktion der Schichtdicke erkennbar – mit dem Ziel, Material- und Energieeffizienz zu steigern und den Indiumverbrauch zu senken. Unsere Untersuchungen zeigen, dass das Laserannealing nicht nur besonders gut für dünne Schichten auf temperaturempfindlichen Substraten geeignet ist, sondern auch Optimierungsräume erschließt, die mit herkömmlichen thermischen Verfahren nicht zugänglich sind. Laserbasierte Annealingprozesse stellen somit eine Schlüsseltechnologie für die zukünftige Herstellung optoelektronischer und photovoltaischer Bauelemente der nächsten Generation dar.

a)



b)

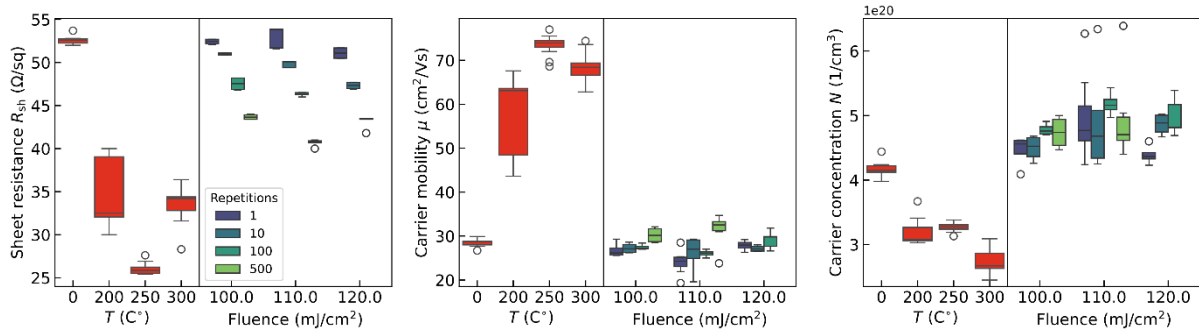
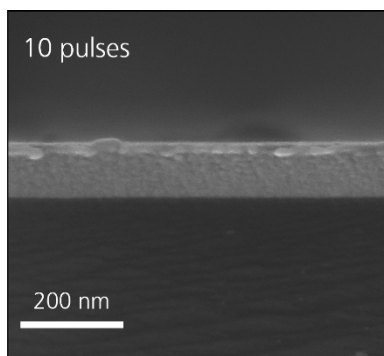
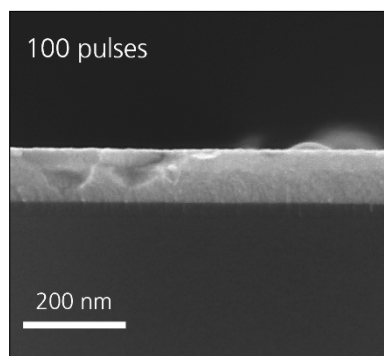


Abbildung 8: R_{sh} , N und μ bestimmt durch Hall-Messungen für a) die p-ITO- und b) die a-IFO-Dünnschicht nach Heizplatten- und Laser-Annealing.

a)



b)



c)

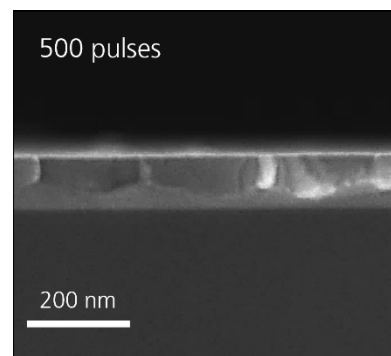


Abbildung 9: Querschnittsaufnahmen mittels REM von laserbehandelten Proben bei einer Fluenz von 110 mJ/cm². Gezeigt werden Ergebnisse für a) 10, b) 100 und c) 500 Pulse.

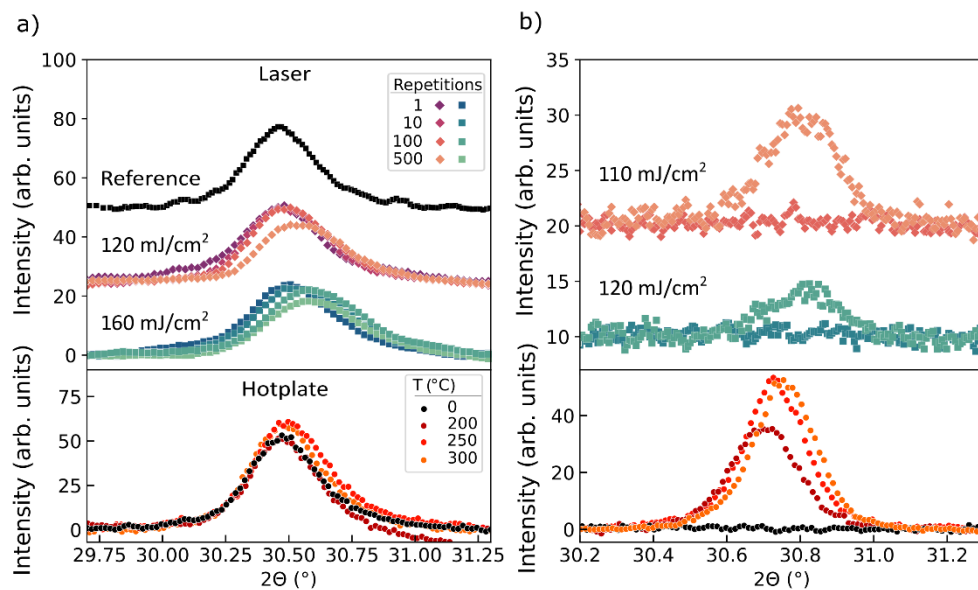


Abbildung 10: XRD Messung des (222)-Reflexes für a) p-ITO und b) a-IFO nach Laserannealing bei verschiedenen Fluenzwerten sowie nach thermischem Annealing auf der Heizplatte

Es wurde auch das Laser-Annealing auf texturierten Proben untersucht, um die Prozesse hinsichtlich des Potentials für die industrieller Anwendung zu analysieren.

Abbildung 11 a) zeigt eine REM-Aufnahme einer ITO-Dünnschicht auf einer texturierten SHJ Solarzelle nach einem Laser-Annealing Prozess. An den Pyramiden-Spitzen und an den Kanten sind teilweise ablatierte Stellen und aufgeschmolzenes Material sichtbar, was zeigt, dass die Temperaturverteilung lateral nicht homogen ist. Dies kann durch eine erhöhte Laser-Intensität an diesen Stellen erklärt werden, die durch Fokussierung der Laserstrahlung durch die TCO Dünnschicht zustande kommt. Diese Aufnahmen zeigen, dass für die Laser Annealing Prozesse von Dünnschichten auf texturierten Proben möglicherweise kleinere Prozessfenster zur Verfügung stehen. Dies ist allerdings kein Ausschlusskriterium für einen industriellen Laser-Annealing Prozess wie die Schichtwiderstandsmessungen in Abbildung 12 zeigen. Hier wird mit Multi-Puls-Prozessen bei 308 nm und einer Pulsdauer von 20 ns eine starke Schichtwiderstandsreduktion von $R_{\text{sheet}} = 3000 \pm 300 \Omega/\text{sq}$ auf $R_{\text{sheet}} = 800 \pm 50 \Omega/\text{sq}$ gemessen. Die niedrigsten Schichtwiderstände sind vergleichbar mit den Hotplate-Annealten Referenzen $R_{\text{sheet}} = 650 \pm 50 \Omega/\text{sq}$. iV_{OC} Messungen in

Abbildung 13 zeigen, dass auch die Schädigung durch den Laserprozess nicht stärker als durch das thermische Annealing ist. Diese Ergebnisse sind ein wichtiger Aspekt für die industrielle Anwendung von Laserprozessen in der Solarzellenproduktion und zeigen deren hohes Potenzial als Alternative zum konventionellen thermischen Annealing.

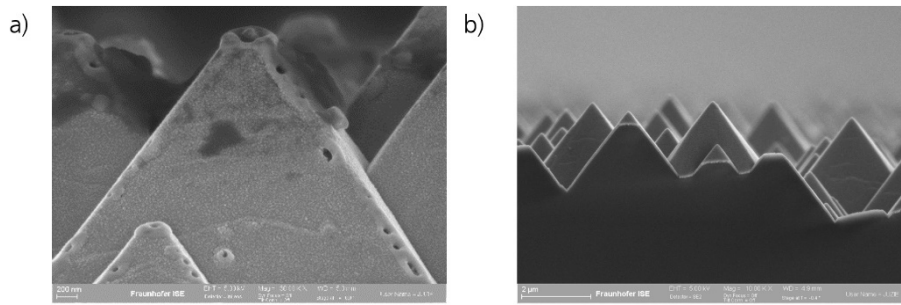


Abbildung 11: REM Bild einer ITO Dünnschicht auf einem texturierten Silizium-Wafer an einer laserannealten Stelle bei der zu hohe Pulsenergien zu lokalem Aufschmelzen der Schicht führen (a). Bei angepassten Laser-Parametern zeigt sich keine Schädigung bei gleichzeitiger Schichtwiderstandsreduktion (b)

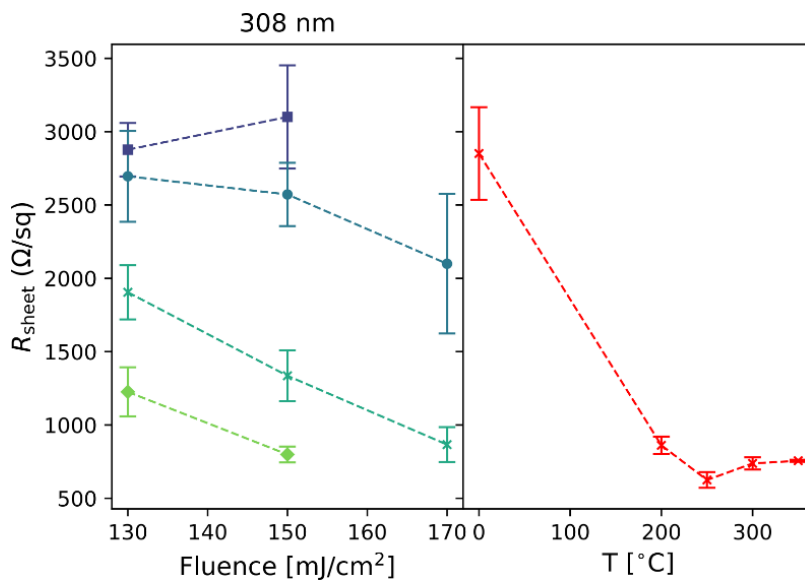


Abbildung 12: Schichtwiderstandsmessung von sauerstoffreichem ITO auf einer texturierten SHJ Probe nach Laser und Hotplate-Annealing. Eine starke Reduktion von R_{sheet} ist für Multipuls-Prozesse sichtbar die vergleichbar zu den Hotplate-annealten Proben ist.

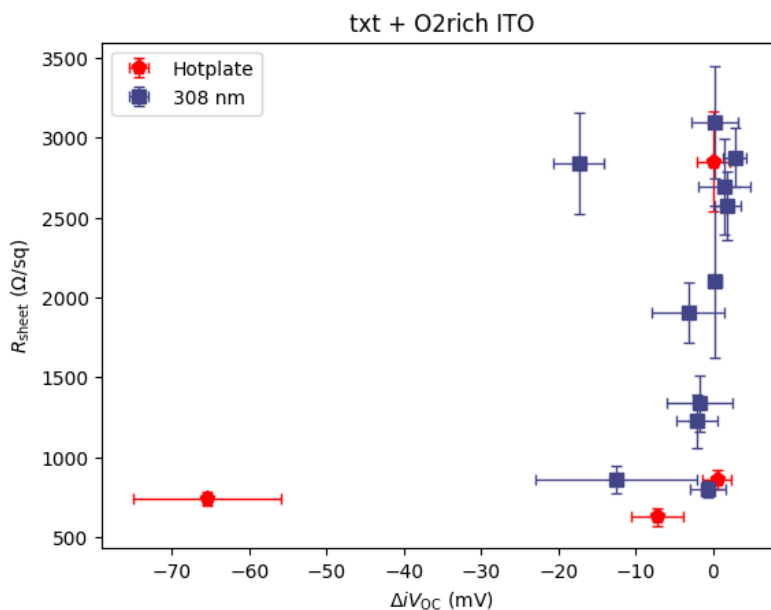


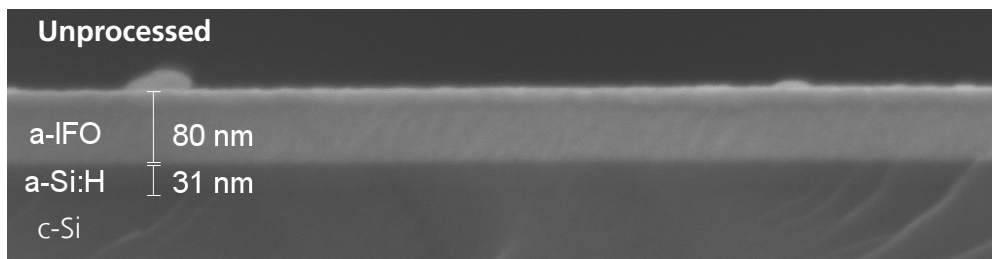
Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Schichtwiderstand und iVOC für verschiedene Laser und Hotplate-annealte Proben. Signifikante Schichtwiderstandsreduktionen können ohne messbare Solarzellenschädigung erreicht werden.

Laserannealing mit Ultrakurzpulsen

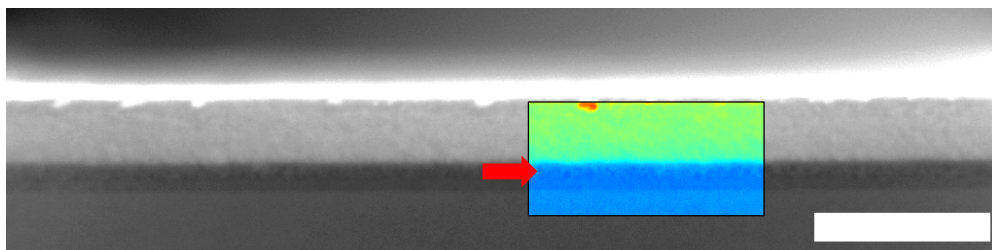
Um zu untersuchen, ob sich der Effekt der thermischen Akkumulation an der Oberfläche durch besonders kurze Bestrahlungsdauer noch weiter verstärken lässt, wurde der Einsatz von von ultrakurzten Pulsen (UKP), also Pulsen mit einer Dauer von wenigen Pikosekunden oder darunter, für das tiefenselektive Annealing von TCOs untersucht. Dafür wurden Experimente auf sauerstoffärmerem ITO (mit initial niedrigen Schichtwiderständen) durchgeführt.

Da die lineare Absorption der verwendeten TCOs im NIR keine Tiefenselektivität ermöglicht, sollte überprüft werden ob nichtlineare oder selbstinduzierte Absorption im TCO selektives Heizen dieser Schicht ermöglicht. Ein Laser-Scanner-System wurde genutzt, um den Einfluss von Pulsdauer ($\tau_p = 185$ fs und $\tau_p = 16$ ps) und Pulsüberlapp (20 und 200 Pulse pro Fläche) auf den Annealing-Prozess zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass eine Reduzierung von $\tau_p = 16$ ps auf $\tau_p = 185$ fs die Eindringtiefe in der Probe reduziert. Jedoch ist dies primär auf nichtlineare Absorptionsmechanismen im a-Si:H und nicht im TCO zurückzuführen, weshalb kein Parametersatz identifiziert werden, der selektives TCO-Heizen ohne Schädigung im a-Si:H erlaubt.

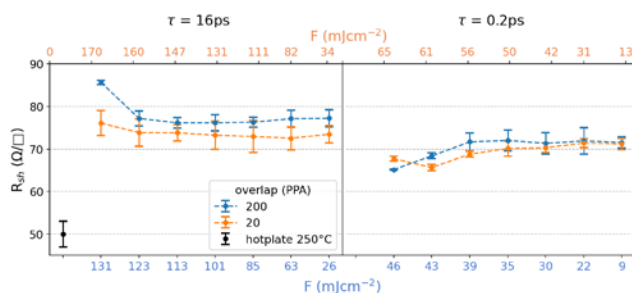
a)



b)



c)



d)

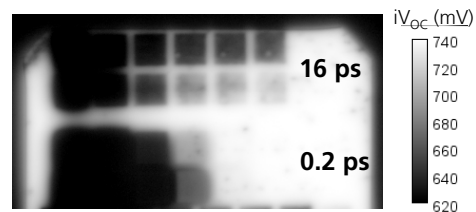


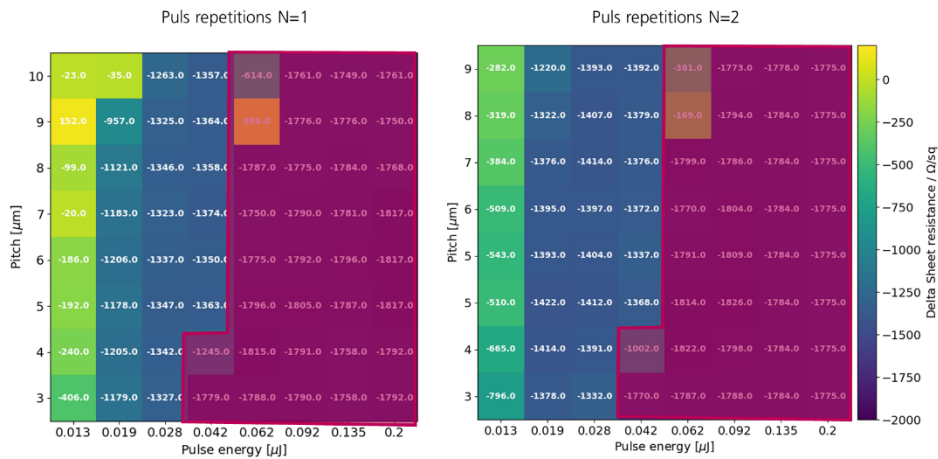
Abbildung 14: SEM Querschnitte einer Probe a) unprozessiert, b) nach Laserbearbeitung mit $\lambda = 1030$ nm, $\tau_p = 0.2$ ps, $F = 61$ mJ/cm² und 20 PPA. In b) wurde ein Falsch-Farben Bild zur Verdeutlichung der Modifikation eingefügt. Die Länge der Scale-bar beträgt 200 nm. c) Schichtwiderstände der $\tau_p = 16$ ps und $\tau_p = 0.2$ ps Prozesse, Fluenz steigt von rechts nach links analog zum PL Bild d), wo für jede Pulsdauer die obere Reihe der Laserfelder bei 200 Pulsen pro Fläche gelasert wurde.

Der Vergleich zweier SEM Querschnitte in Abbildung 14, einer unprozessierten Referenz in a) und eines laserbearbeiteten Feldes b) zeigen, dass der Laserprozess die a-Si:H Schicht modifiziert, während die TCO

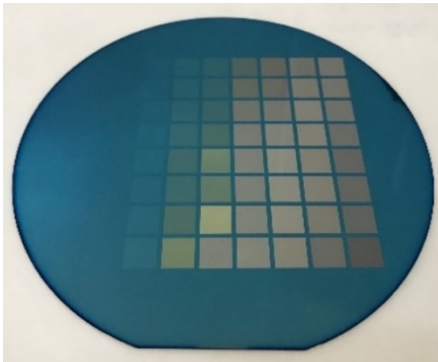
Schicht eines amorphen TCOs (a-IFCO) unverändert bleibt. Modulierte Photolumineszenz Messungen in Abbildung 14 d) zeigen eine starke Reduzierung der implied open circuit voltage (iV_{oc}) bei gleichzeitig unverändertem Schichtwiderstand in Abbildung 14 c).

Um oberflächlichere Absorption zu erreichen, bei gleichzeitig reduzierter Wärmediffusion, wurden UKP-Prozesse im UV erprobt. Es wurden auf einem Wafer mit sauerstoffreichem ITO 1 cm x 1 cm große Felder mit einem Nd-YAG Laser (dritte Harmonische $\lambda = 355$ nm) bei 40 kHz laserbearbeitet.

(a)



(b)



(c)

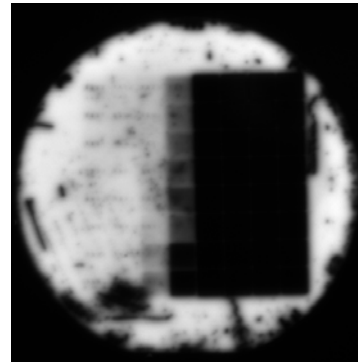


Abbildung 15 (a) Schichtwiderstands-Differenz zwischen initialem Wafer und laserbearbeiteten Feldern nach dem ersten Scan (links) und dem zweiten Scan (rechts). Die ablatierten Felder sind rot markiert. (b) Das Foto des laserbearbeiteten Wafers zeigt die ablatierten Felder für hohe Pulsenergien. (c) Ein Photoluminescence Bild des Wafers. Ablatierte Felder zeigen kein PL signal, da die Oberflächenpassivierung des Wafers zerstört ist. Die Laserannealten Felder mit reduziertem Schichtwiderstand zeigen dagegen kaum eine Verringerung des PL Signals.

Abbildung 15 (a) zeigt Schichtwiderstandsmessungen der ITO Dünnschicht, die mit dem Nd-YAG Laser bei 40 kHz laserbearbeitet wurden. Dabei wurden die Felder mit verschiedenem Pulsüberlapp (Pitch) und Pulsenergie (auf x- und y-Achse) abgerastert. Nach einem Scan wurden die Schichtwiderstände in jedem Feld gemessen (linker Plot). Dann wurde mit den selben Parametern auf dem Wafer ein zweiter Scan durchgeführt. Bei niedrigen Pulsenergien von 0.13 μJ bis 0.28 μJ konnte der Schichtwiderstand nach zwei Scans um bis zu 1400 Ω/sq auf (von 2250 Ω/sq auf 850 Ω/sq) gesenkt werden. Ab einer Pulsenergie von 0.062 μJ wurde das ITO ablatiert (siehe Foto in (b)), was auch im PL Bild in (c) als stark reduziertes PL Signal zu sehen ist. Die Felder mit verringerter Schichtwiderstands-Reduktion zeigen eine leichte Verringerung des PL Signals. Vergleicht man die beiden Datensätze, sieht man auch hier wieder die kumulative Verringerung des Schichtwiderstands.

Zur vertieften Untersuchung des UKP-Annealings wurde auf ein Lasersystem zurückgegriffen, welches Pulsdauer variabel im Bereich 0.185 bis 2ps bei $\lambda = 343 \text{ nm}$ und 1030nm einstellen lässt. Die TCO-Absorption ist bei 343nm um eine Größenordnung höher als diejenige die im Nahinfrarot Experiment verwendet wurde. Räumlicher Pulsabstand und Fluenz wurden in den Experimenten variiert (10 – 10 000 Pulse pro Fläche; $F = 30$ und 40 mJ/cm^2). Für einen hohen Pulsüberlapp konnte der Schichtwiderstand des TCOs deutlich reduziert werden, jedoch war die Schichtwiderstandsreduktion geringer als durch den Heizplatten Referenzprozess (Abbildung 16 a). Für solche Proben die reduzierten Schichtwiderstand aufweisen, zeigte sich jedoch eine Schädigung der a-Si:H Passivierung in einer Reduktion des iV_{oc} , welche mit modulierter PL ermittelt wurden. Die PL-Messungen zeigten eine besonders starke Reduktion des iV_{oc} am Rand der laserbearbeiteten Felder (Abbildung 16 b). Dieser Effekt ließ sich auf die Modifikation der a-Si:H Schicht zurückführen. SEM-Querschnittsbilder zeigen eine Nukleation von Voids am TCO-a-Si:H interface (Abbildung 16 c) für Laser Prozesse mit Pulsüberlappen von 1000 und 5000 Pulsen pro Fläche. Die Proben die einen reduzierten TCO schichtwiderstand haben zeigen besonders stark reduzierte iV_{oc} Werte innerhalb der Felder. Dies korreliert mit einer Kristallisation der a-Si:H Schicht, die in den SEM-Querschnitten sichtbar wird (Abbildung 16 c) und mit Raman Messungen bestätigt wurde.

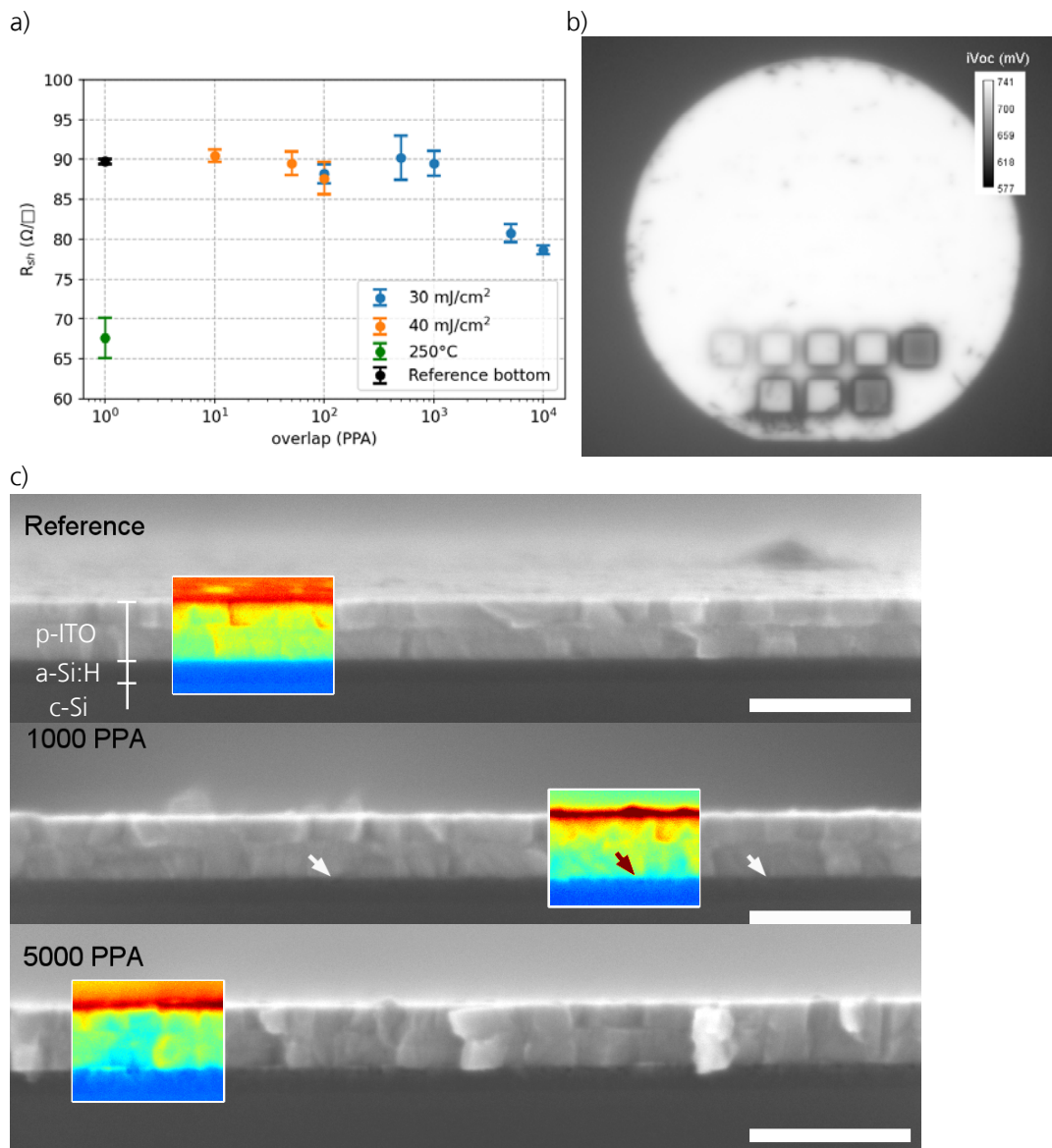


Abbildung 16: a) Schichtwiderstand des TCOs nach Laserbearbeitung bei verschiedenem Überlapp und zwei Fluenzen, b) iV_{oc} eines Probenwafers mit Laserbearbeiteten Feldern. c) SEM Querschnitte einer Referenz und zweier gelaserteter Felder mit verschiedenen Pulsüberlappen mit Falsch-Farben Bildern zur Verdeutlichung der Modifikation im a-Si.

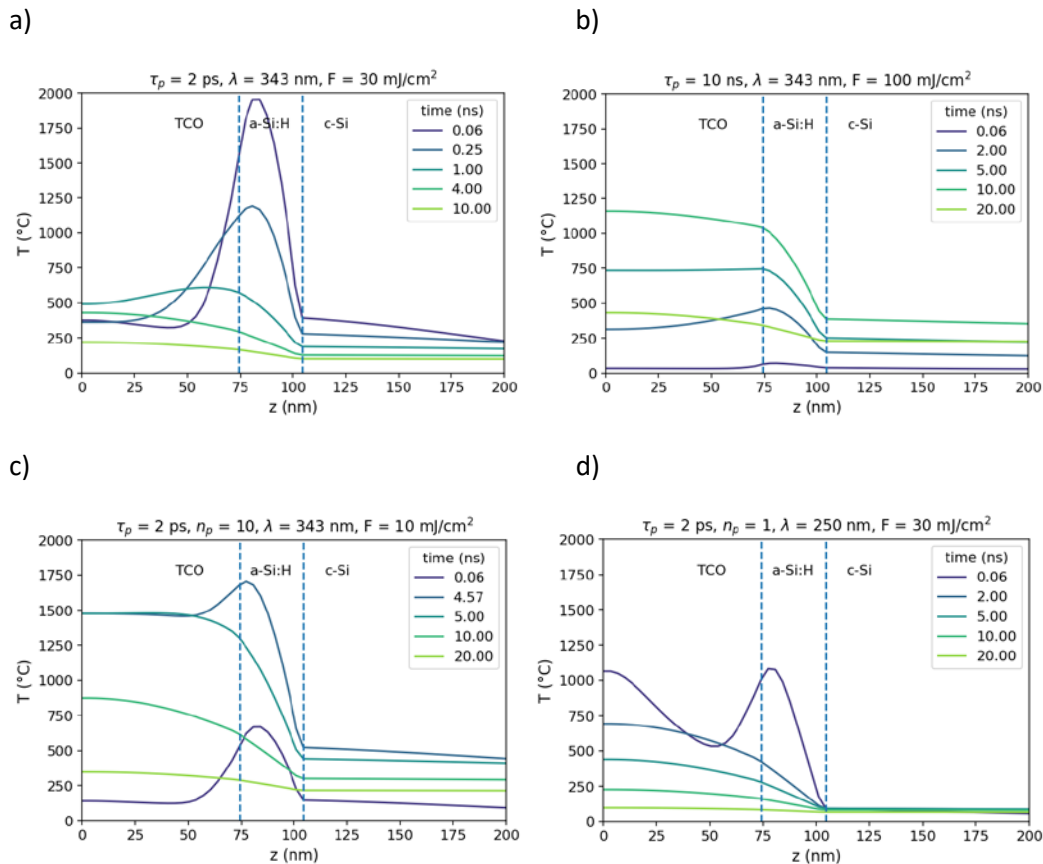


Abbildung 17: Simulierte Temperaturverteilung in der Probe unter Bestrahlung mit UV Laser Pulsen verschiedener Pulsdauern und Fluenzen. In c) wurde ein Puls-Burst bestehend aus 10 Pulsen mit einer Frequenz von 2GHz simuliert.

Bei Nanosekunden-Annealing mit einer Wellenlänge von 343nm konnte ein Annealing-Effekt gezeigt werden. Da jedoch Pulse derselben Wellenlänge bei einer Pulsdauer im Pikosekundenbereich starke Schädigung erzeugt, wurde der Einfluss der Pulsdauer auf den Heizprozess mit Hilfe von Simulationen der Wärmediffusion und Absorption untersucht. Die Ergebnisse für unterschiedliche Pulsdauern und Wellenlängen sind in Abbildung 17 gezeigt. Es zeigt sich in a), dass für 343 nm die Absorption im TCO zu gering ist, um den gesamten Laserpuls zu absorbieren. Signifikante Intensitäten erreichen somit das a-Si:H, was dadurch eine höhere Heizrate erfährt. Da während des Pikosekundenpulses keine Wärmeumverteilung stattfindet, erreicht das a-Si:H deutlich höhere Temperaturen als das TCO, was die beobachtete a-Si:H Schädigung im Experiment erklärt. Für die Simulation eines ns Pulses, in b) dargestellt, liegt dieselbe Heizrate während der Absorption des Laserpulses. Auf der ns-Zeitskala findet Wärmediffusion statt und Wärme fließt vom a-Si:H ins TCO und c-Si. So wird die effektive Heizrate im a-Si:H reduziert und im TCO erhöht, was zu einer deutlich höheren mittleren Temperatur im TCO als im a-Si:H führt und selektives Annealing ermöglicht. Die Simulationen haben auch nahegelegt, dass der Einsatz eines 2 GHz Bursts mit 10 intra-burst Pulsen bei $\lambda = 343$ nm, ns-Pulse emulieren kann (Abbildung 17 c), jedoch konnte mit der verwendeten Strahlquelle lediglich ein Burst von 3 Pulsen erzeugt werden, der keine signifikante Reduktion der Schädigung ermöglichte.

Somit erscheint für die verwendeten SHJ Schichten selektives UKP Laser Annealing nur möglich wenn der Großteil des Laserpulses im TCO absorbiert wird, was für Wellenlängen $\lambda < 300$ nm der Fall ist (siehe Abbildung 17 d). Für längere Pulsdauern im ns Regime ermöglicht die spezielle Schichtung der Probe eine Wärmeumverteilung was auch für längere Wellenlängen im UV selektives Annealing ermöglicht. Eine Zusammenfassung der Simulierten und experimentellen Ergebnisse ist in Tabelle 5 dargestellt. Während TCO Annealing mit UKP als kaum zielführend erachtet wird, zeigt sich eine starke Wechselwirkung zwischen UKP Pulsen und a-Si:H. Für $\lambda = 343$ nm mit $\tau_p = 2$ ps wurde eine vollständige Umkristallisation des a-Si:H erzeugt, was von einer hohen Pulszahl abhängig ist ($> 1k$ Pulse pro Fläche). Im

NIR wurde für eine Pulsdauer von 0.185 ps eine lokale Modifikation der a-Si:H Schicht induziert, die auf nichtlineare Absorption des Pulses zurückzuführen ist (Abbildung 14 b)). Für die NIR Pulse mit $\tau_p = 0.185$ ps wurde keine Umkristallisation des a-Si:H beobachtet, jedoch wurden lediglich Pulsüberlappungen von maximal 200 Pulsen pro Fläche verwendet. Da im UV Experiment erst ab 5000 Pulsen pro Fläche Kristallisation beobachtet wurde, kann auch im NIR erwartet werden, dass ein höherer Überlapp zu Kristallisation führt.

Tabelle 5: Übersicht über die Lokalisierung der primären Laserabsorption und der daraus resultierenden Hauptwärmeentwicklung bei verschiedenen Wellenlängen und Pulsdauern auf SHJ-Solarzellensubstraten.

λ (nm)	Pulsdauer τ_p	Primäres Heizen im
1030	16 ps	keine Modifikation unterhalb der Zerstörgrenze
1030	185 fs	a-Si:H
343	2 ps	a-Si:H
250-343	20 ns	TCO

IPL für TCO Annealing

Besonders energieintensive und spektral breite Pulse lassen sich mit Blitzlampen erzeugen. Gegenüber Lasern ergibt sich der Vorteil einer kostengünstigen globalen Bestrahlung, mit allerdings deutlich längeren Pulsen. Es wurden Versuche zum Heizen von Indiumoxid Dünnschichten auf Glas mittels einer Xenon Blitzlampe mit einer Novacentrix PulseForge 1300 Anlage durchgeführt. Dabei wurde die Pulsdauer und Lampenspannung variiert. Die Lampenspannung korreliert dabei direkt mit der Spitzenintensität des Pulses. So wurden verschiedene Fluenzen mit unterschiedlichen Intensitäten realisiert. In Abbildung 18 ist die gemessene Schichtwiderstandsreduktion dargestellt. Es zeigt sich zum einen eine starke Abhängigkeit von der Pulsdauer. Bei gleicher Spannung (Also gleicher Intensität) führt eine längere Pulsdauer zu einer höheren Pulsenergie und damit stärkeren Schichtwiderstandsreduktion. Bei gleicher Pulsdauer führt ebenfalls die höhere Intensität zu verstärkter Schichtwiderstandsreduktion. Hier ist zu erwarten, dass die emittierte Wellenlänge der Blitzlampe von TCOs kaum direkt absorbiert wird. Daher wird hier entweder das Substrat oder der unterliegende Chuck geheizt und das TCO indirekt geheizt. Im Vergleich zu einem 10 min dauernder Heizplattenprozess wird durch solche IPL Prozesse die gesamte Probe vergleichsweise kurz auf höhere Temperatur gebracht und je nach eingestellter Prozess kann die Gesamtprozesszeit deutlich verkürzt werden.

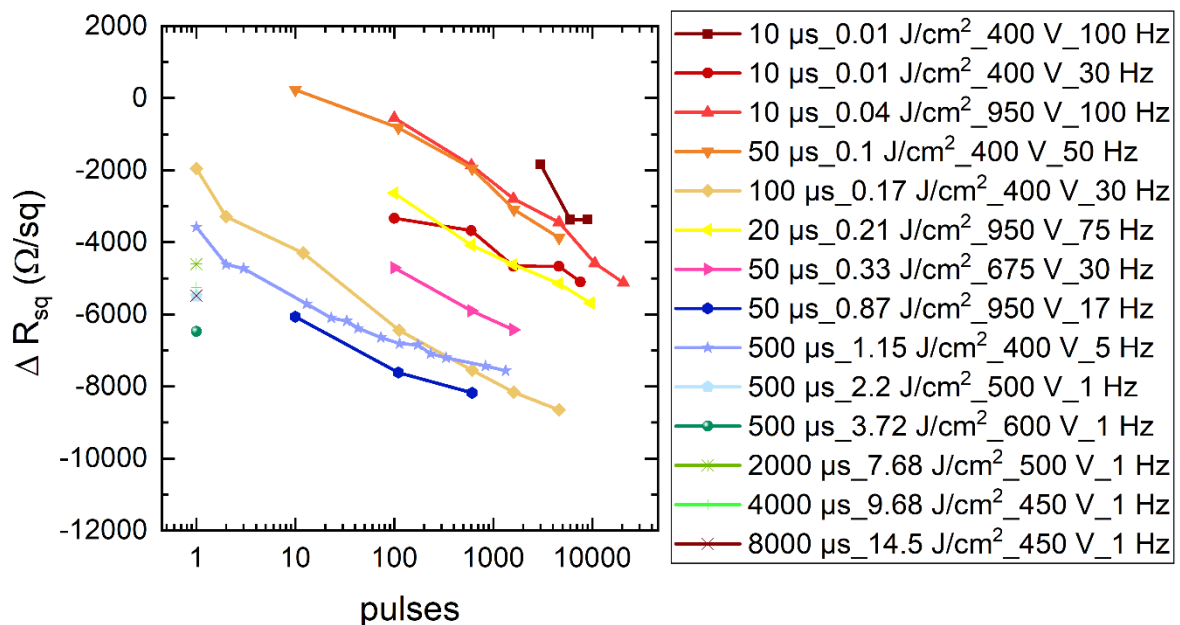


Abbildung 18: Schichtwiderstandsreduktion von IO:H Dünnschichten durch IPL Blitzlampen Prozesse bei verschiedenen Pulsdauern, eingestellter Spannung und Puls wiederholungen.

2.1.3 AP 3 Charakterisierung und Modellierung von strukturellen Umwandlungsprozessen

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M3.1 Aufnahme von Photolumineszenzspektren an TCO-Schichten	Photolumineszenzspektren mit optischer Anregung von 355nm wurden an ITO-Schichten aufgenommen und deren Peaks identifiziert, s. Abbildung 21 und Abbildung 22.	M6	Zeitplan eingehalten

In diesem Arbeitspaket wurden optische Messverfahren, insbesondere Ramanspektroskopie, PL-Spektroskopie und Sheet Resistance Imaging an die Anforderung zur Messung dünner Schichten angepasst und im Projekt zur Optimierung technologischer Schritte angewendet. Im Folgenden sind ausgewählte Messbeispiele gezeigt, die zur Bewertung von TCO-Schichten herangezogen wurden.

Charakterisierung von Dünnschichten mittels Ramanspektroskopie

Für das Projekt wurden Detail-Ramananalysen zur Bewertung dünner Schichten bereitgestellt. So wurden z.B. an denen in Abbildung 15 beschriebenen Proben auf mehreren Testfeldern Raman-Spektren mit einer Anregung von 355nm mit einer Integrationszeit von 5 Minuten aufgezeichnet. Beispielhaft sind in Abbildung 19 je ein Spektrum der Felder mit einem Pitch von 3 μm und Energie von 0,028 μJ bzw. 0,042 μJ gezeigt. Neben dem scharfen Raman-Peak von kristallinem Silizium bei 521 rel. 1/cm ist bei 480 rel. 1/cm der Raman-Peak von amorphem Silizium prägnant. Die Charakterisierung der aSi-Zwischenschicht mittels UV Raman Spektroskopie ist damit gezeigt. Des Weiteren kann im Spektrum, welches im Testfeld mit der niedrigeren Laserleistung von 0,028 μJ aufgenommen wurde, die Peaks bei 133 und 633 rel. 1/cm mit Raman-Peaks von c-In₂O₃ (Bixbyite Struktur) identifiziert werden. Das Fehlen eines prägnanten Peaks des Bixbyite Indiumoxids bei 303 rel. 1/cm sowie die höhere Peakbreite der gemessenen Peaks verglichen mit Literaturwerten deuten auf eine geringere Kristallinität hin (wie zu erwarten), möglicherweise auch Beiträge von h-In₂O₃.

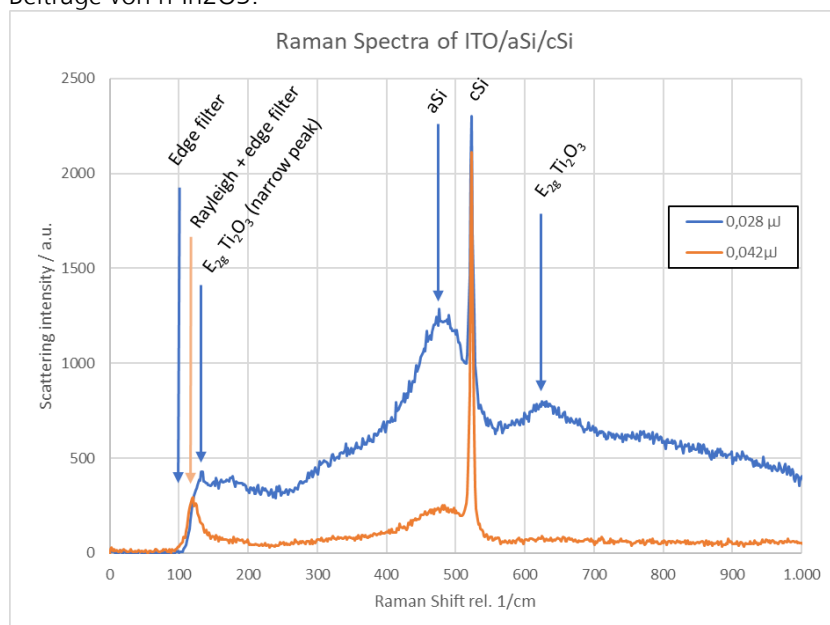


Abbildung 19: Ramanspektren auf Testfeldern der Probe in Abbildung 15

Die Ramananalyse wurde im Folgenden für eine Korrelation zu Schichteigenschaften herangezogen. Neben der laserinduzierten Schichtwiderstandsänderung ΔR_{sheet} ist die Rekombination in der Solarzelle,

detektiert mit Photolumineszenz, interessant. In Abbildung 20 sind diese Parameter auf einem Testfeld (s. Abbildung 15) dargestellt und mit integrierten Peakintensitäten des a-Si-Peaks und des ITO-Peaks verglichen.

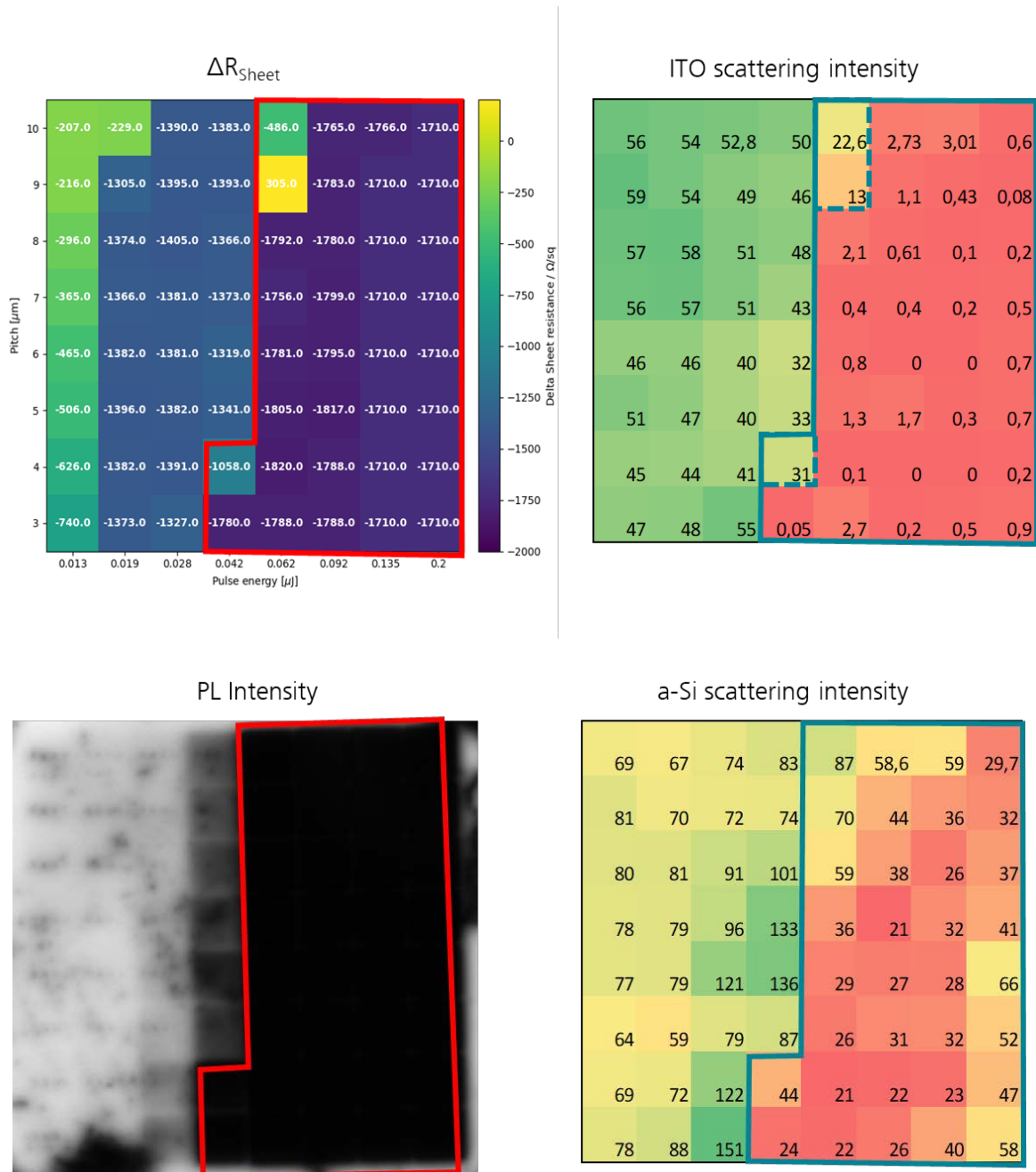


Abbildung 20: Vergleich der Ramanspektren auf Testfeldern der Probe in Abbildung 15. Links oben ist die laserinduzierte Schichtwiderstandsverteilung zu sehen, die mit der integrierten Raman-Intensität des ITO Peaks um 630nm (rechts oben) sowie des a-Si-Peaks um 480nm (rechts unten) korreliert. Links unten zu sehen ist die PL-Intensitätsverteilung zum Vergleich.

Charakterisierung von Dünnschichten mittels Photolumineszenzspektroskopie

Anregungslicht mit einer Wellenlänge von 355 nm wird wenig von ITO absorbiert. In den in Abbildung 19 gezeigten Ramanspektren können deshalb problemlos die Signaturen der darunterliegenden Materialien (aSi/cSi) gemessen werden. Zusätzlich wurde eine Messung der Photolumineszenzemission durchgeführt im Testfeld mit Pitch von 3 μm und niedrigster Energie von 0,013 μJ . Ein entsprechendes Ramanspektrum zeigt das Vorhandensein von TCO. In Abbildung 21 ist eine Messung des Spektrums mit niedriger spektraler Auflösung gezeigt. Tatsächlich kann eine schwache Signatur der Photolumineszenz nachgewiesen werden. Zwar ist die Intensität des Raman-Streulichts selbst in höheren Ordnungen dominant (v.a. durch das darunterliegende Silizium). Während die Band-Band Photolumineszenz aufgrund des überlagerten Ramanstreulichts nur schwach ausgeprägt ist, so ist die grüne Defektlumineszenz deutlich sichtbar.

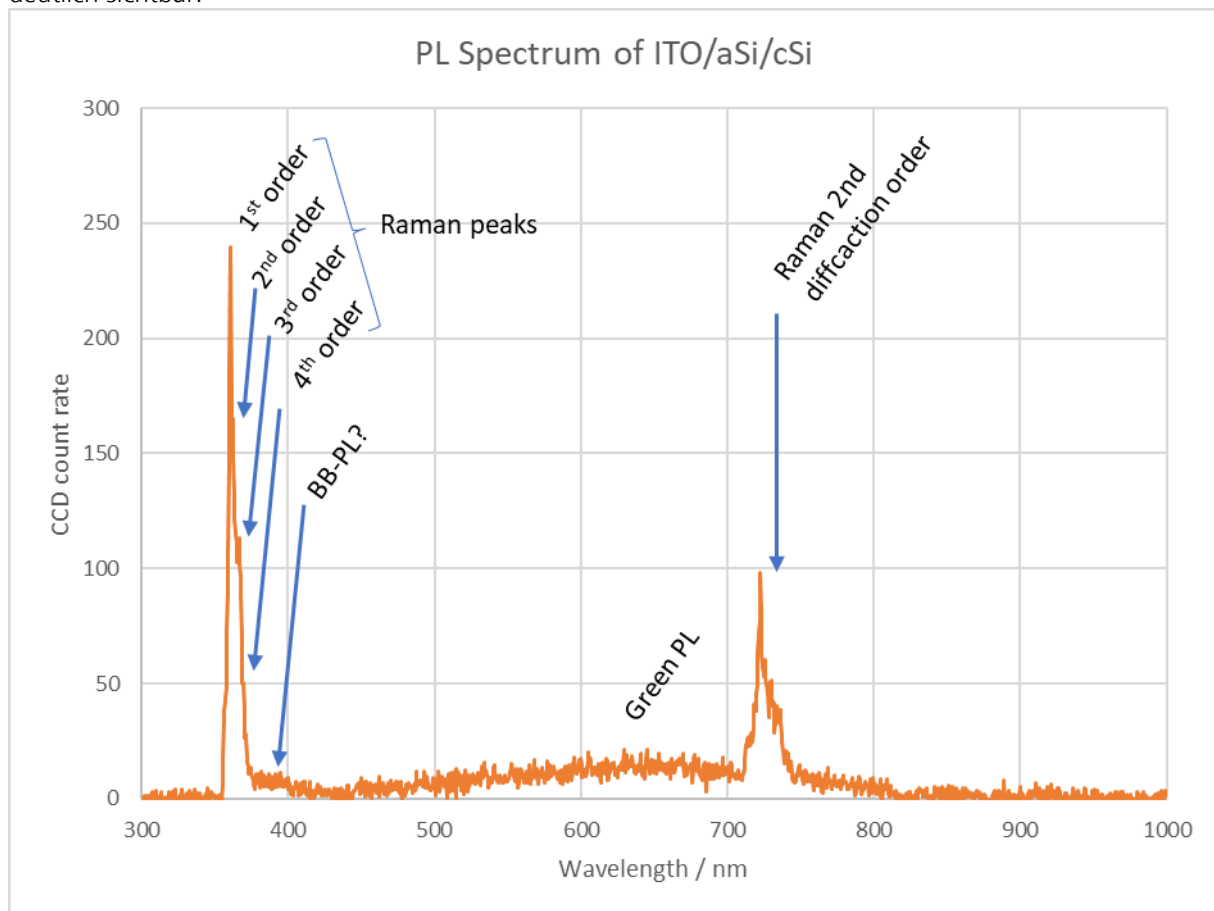


Abbildung 21: PL-Spektrum von ITO, angeregt mit einer Wellenlänge von 355 nm.

Es zeigt sich, dass die Verwendung des 355nm-Anregungslasers für die Photolumineszenzanalyse von ITO-Schichten nur schwache BB-PL Signale erzeugt. Deshalb wurde im Rahmen des Projekts ein Laser mit geringerer Wellenlänge von 266nm aufgebaut, der mit deutlich höherer Sensitivität Lumineszenzanalysen zulässt. So können z.B. Annealingprozesse in TCOs charakterisiert werden. In Abbildung 22 sind PL Spektren vor und nach Heizplatten-Annealing der amorphen IFO Dünnschicht gezeigt. Es zeigt sich im nicht annealten Zustand nur das Bandlücken Photolumineszenz Signal. Mit Annealing bildet sich eine Kristallstruktur aus, die eine definierte Defekt-Photolumineszenz im grünen zeigt. Dies könnte durch Sauerstoff-Fehlstellen im Indium-Oxid Kristall entstehen, welche als Dotanden in solchen TCO Dünnschichten dienen. Dieses Ergebnis korreliert mit der steigenden Ladungsträgerkonzentration des IFO durch Annealing (siehe Abbildung 8b)).

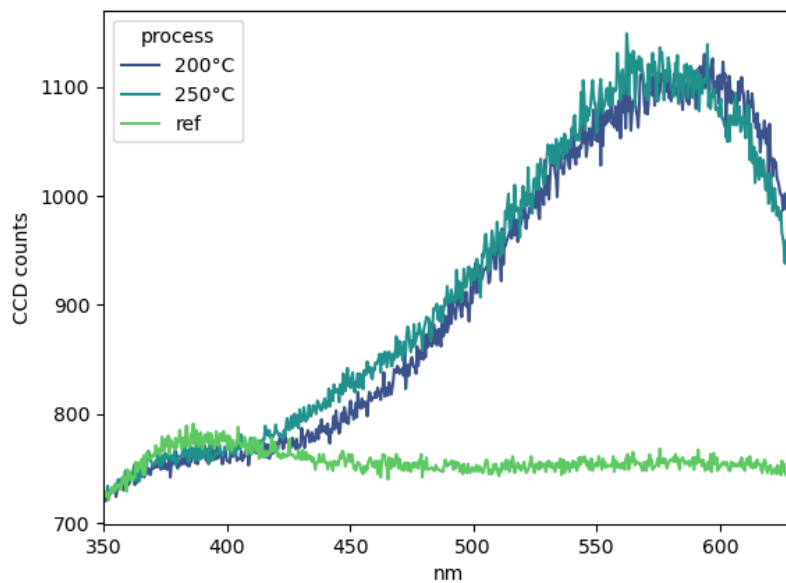


Abbildung 22: PL-Spektren von IFO Schichten vor und nach Annealingschritten auf einer Hotplate mit 200 bzw. 250 °C, angeregt mit einer Wellenlänge von 266 nm. Die Messung zeigt die amorphe Natur der Schicht im Ausgangszustand sowie einen ausgeprägten Defekt-PL-Peak bei 580nm, der mit Sauerstoff-Leerstellen in In_2O_3 korreliert werden kann.

Sheet Resistance Imaging

Dieses Verfahren eignet sich zur raum aufgelösten Messung von Schichtwiderständen durch die Messung der IR-Emission von thermisch angeregten Ladungsträgern. Es wurde eine verbesserte Messanordnung im Dunkel-Lockin-Thermographie-Setup umgesetzt. Es wurden dotierte Si-Wafer charakterisiert und miteinander verglichen. Dabei wurden sowohl texturierte als auch SDE-Wafer untersucht. Bei den TCOs wurden Sauerstoffkonzentration und Dicke variiert. Es konnte die erwartete Korrelation zwischen den elektrischen Eigenschaften und dem IR-Signal festgestellt werden. Es zeigen sich außerdem Oberflächeneffekte, die das Signal stark verfälschen können. Die Messmethode ist aufgrund der Raumaufklärung also sehr geeignet zur qualitativen Auswertung von laserbearbeiteten Proben, muss zur quantitativen Interpretation allerdings sorgfältig geeicht werden.

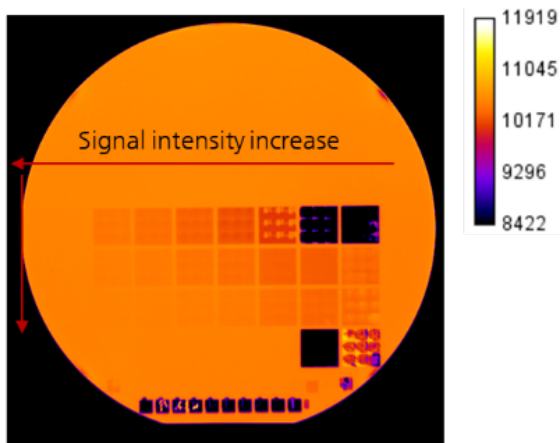


Abbildung 23: Ergebnisse zur Schichtwiderstandsmessung mittels Sheet Resistance Imaging. Unten zeigt sich der Zusammenhang zwischen SRI-Signalstärke und Schichtwiderstand. Wie oben erkennbar, lässt sich so die Schichtwiderstandsverteilung einer laserbearbeiteten Probe messen und damit Laserparameter bewerten.

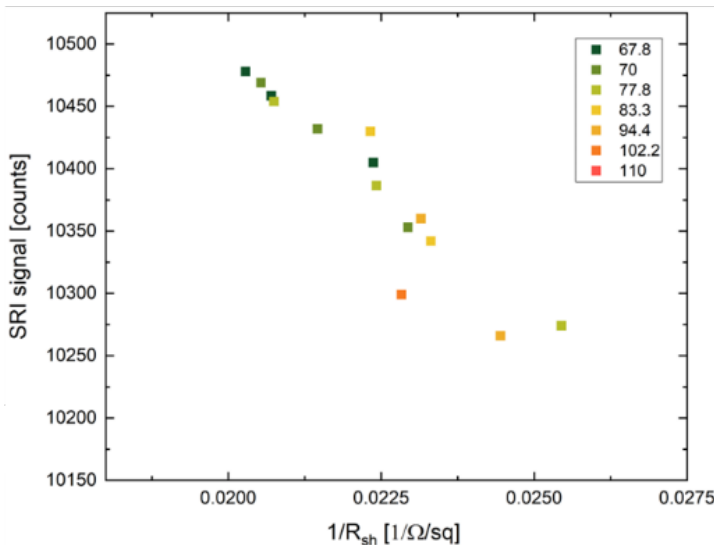


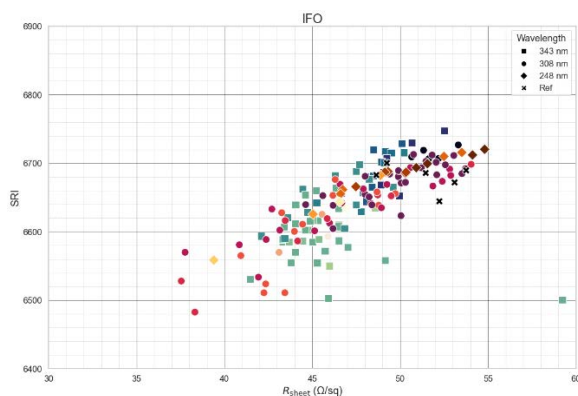
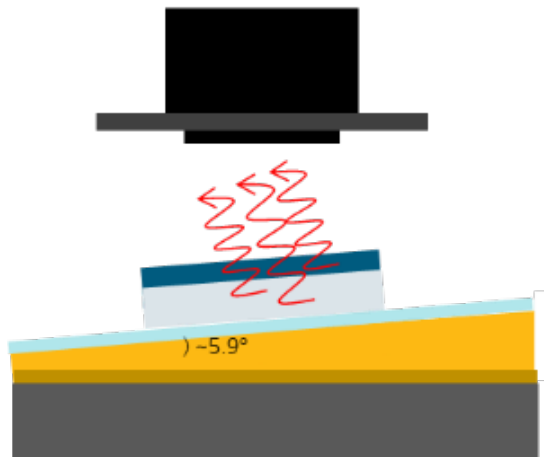
Abbildung 24 zeigt den Aufbau schematisch. Für die Messung wird die Probe auf einen Heiz-Chuck gelegt und auf 60 Grad Celsius erhitzt. Mit einer Infrarotkamera wird die Emission der freien Ladungsträger detektiert. So erhält man ein Bild, dass die lokale Ladungsträgerkonzentration widerspiegelt. Leitfähigkeit σ , Widerstand R und Ladungsträgerkonzentration N hängen über die Mobilität μ wie folgt zusammen:

$$\sigma = \frac{1}{R} = e \cdot N \cdot \mu$$

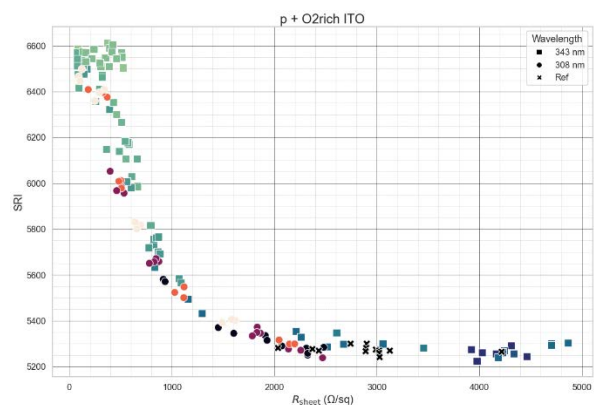
Für eine konstante Mobilität μ wird also eine $1/R_{\text{sheet}}$ Abhängigkeit der Ladungsträgerkonzentration bzw. des SRI Signals erwartet.

Im Berichtszeitraum wurden SRI-Messungen an verschiedenen TCOs durchgeführt, darunter ein amorphes Indiumoxid (IFO) und ein polykristallines, Zinn-dotiertes Indiumoxid. Die TCOs wurden auf Silizium Wafer abgeschieden und mit UV Nanosekunden Laser-Prozessen annealt. Dabei wurden die Systeme der beiden Projektpartner Coherent ($\lambda = 248 \text{ nm}$, 308 nm) und Innovaent $\lambda = 343 \text{ nm}$ verwendet.

Abbildung 24: Schematische Darstellung des Sheet Resistance Imaging (SRI) Aufbaus.



a)



b)

Abbildung 25: Die Abhängigkeit des Sheet-Resistance-Imaging (SRI) Signals vom Schichtwiderstand R_{sheet} für Laser-annealte Bereiche auf a) IFO und b) ITO Dünnschichten.

Abbildung 25 zeigt die lokal ausgewertete SRI Messung, aufgetragen gegen den lokal gemessenen Schichtwiderstand, für verschiedene, Laser-annealte Felder. Für das polykristalline ITO zeigt sich ein eine $1/x$ Abhängigkeit des SRI-Signals vom Schichtwiderstand, was eine steigende Ladungsträgerkonzentration erwarten lässt. Hall-Messungen bestätigen dies Abbildung 26 a).

Das IFO zeigt einen linearen Anstieg des SRI-Signals mit dem Schichtwiderstand. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Ladungsträgerkonzentration für dieses TCO mit Annealing sinkt, wie Hall Messungen der Hotplate annealten Proben zeigen (siehe Abbildung 26 b)).

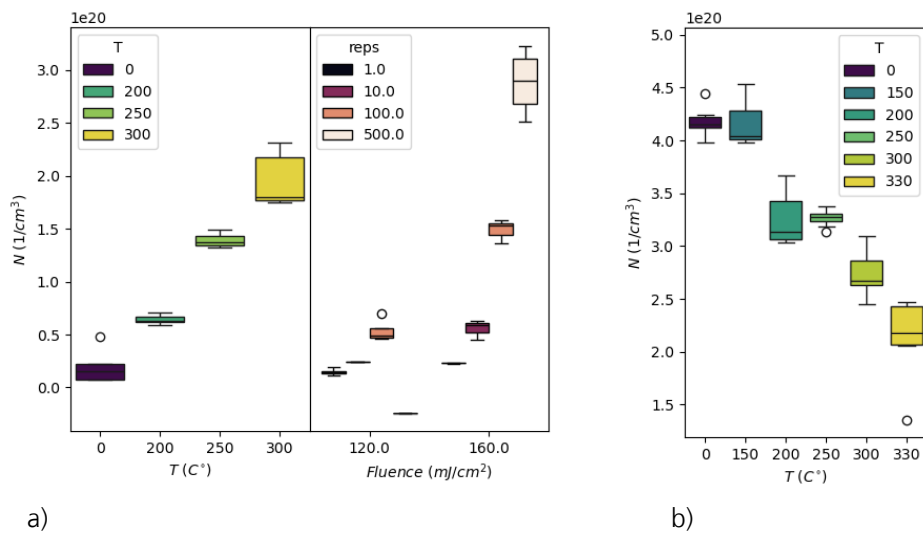


Abbildung 26: Ladungsträgerkonzentration von a) laser und hotplate annealten ITO Proben und b) Hotplate annealten IFO Proben, gemessen mittels Hall-Messung.

Insgesamt zeigt die SRI-Messung an verschiedenen TCO-Schichten eine TCO-abhängige Korrelation von Schichtwiderstand zu SRI-Signal. Dies kann genutzt werden um bildgebend, sehr schnell lokale Unterschiede im Schichtwiderstand aufzulösen ohne eine kontaktierende Methode wie zum Beispiel Schichtwiderstands Messung oder gar eine destruktive Methode wie Hall Messungen zu nutzen. So kann in Zukunft eine breite Laser-Parameter Variation getestet und schnell qualitativ ausgewertet werden.

2.1.4 AP 4 Entwicklung einer Laser-basierten RTP Anlage für direktes Wafer-Heizen und Hochtemperaturprozesse mit sehr kurzen Zyklen

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M4.3 Fertigstellung Laser-RTP Ofen mit Vakuum-Prozesskammer	Eine flexible laserbasierte RTP-Laseranlage wurde erfolgreich konzipiert und umgesetzt, und es wurde ein signifikanter Wissensaufbau zur Verbesserung der energetischen Effizienz erarbeitet.	M24	Die finale Fertigstellung wurde aufgrund einer verzögerten Lieferung der Vakuumkammer verschoben (geplant war M18)
M4.1 Nachweis Werkstücktemperatur 1400°C unter Normalbedingungen auf 15x15mm ² (Silicium)	Silizium oberflächennah zum Schmelzen gebracht	M30	Aufgrund ungeplanten Ausfalls der Laserdioden wurden die Versuche auf nach der Fertigstellung des Upgrades verschoben (geplant war M12)
M4.5 Nachweis Werkstücktemperatur 1600°C unter Vakuum-Atmosphäre auf 15x15mm ² (Silicium-Carbid)	Silizium-Carbid bis ca. 1700 °C mit Heizrampen von 770 K/s erfolgreich geheizt	M30	Aufgrund Verzögerungen (s.o.) Durchführung erst am Projektende (geplant war M24)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein laserbasierter Rapid Thermal Processing (RTP)-Ofen entwickelt und evaluiert. Ziel war es, die erreichbaren Hochtemperaturen sowie die Präzision und Flexibilität des rein photonischen Wärmeeintrags zu untersuchen und somit die Einschränkungen traditioneller Ofentechnologien zu überwinden.

Hierzu wurde auf Basis des bestehenden laserbasierte Rapid Thermal Processing (RTP)-Ofens am Fraunhofer ISE eine neue Anlage entwickelt. Diese Weiterentwicklung ermöglichte die Untersuchung von Hochtemperaturprozessen im Vakuum für Silizium-Carbid ($T > 1600 \text{ °C}$) zusätzlich zu den bisherigen Annealing-Prozessen unter Normalatmosphäre. Um konvektive Verluste zu reduzieren und höhere Temperaturen sowie steilere Heizrampen zu erreichen, wurde der RTP-Aufbau um eine speziell entwickelte Vakuumkammer erweitert. Diese Vakuumkammer wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner NTG realisiert.

Zur Umsetzung der genannten Anforderungen fanden folgende Entwicklungen statt:

- Ein neues Anlagenkonzept wurde erarbeitet und umgesetzt, das es ermöglicht, sowohl unter Normalatmosphäre als auch im Vakuum zu arbeiten.
- Die Auslegung des optischen Fensters der Vakuumkammer für eine vollflächige Bestrahlung von Wafern mit $210 \times 210 \text{ mm}^2$ wurde durchgeführt. Dieses optische Fenster dient einerseits als Einkopplungsfenster für den Laser und muss andererseits dem Atmosphärendruck standhalten. Dabei wurde ein optimales Verhältnis zwischen Fensterdicke und Temperaturerhöhung durch den Laser und thermische Strahlung identifiziert.
- Darüber hinaus wurden Möglichkeiten zur energieeffizienten Erwärmung untersucht, insbesondere durch die Reduktion des Wärmeübergangs mit der Umgebung durch thermische Strahlung sowie durch eine effiziente Redimensionierung der vollflächigen Laserbestrahlung, um eine möglichst hohe Temperatur und Homogenität bei gegebener Laserleistung zu erzielen.

Diese Fortschritte tragen dazu bei, die Effizienz und Effektivität laserbasierter Wärmebehandlungsprozesse signifikant zu steigern und eröffnen neue Perspektiven für die Anwendung in der Materialbearbeitung.

Entwickeltes Anlagenkonzept und Umsetzung

Um die unterschiedlichen Prozessanforderungen wie eine Prozessierung unter Normalatmosphäre, definierter Atmosphäre (z.B. Stickstoff) sowie unter Vakuum zu erfüllen, wurde das in Abbildung 27 dargestellte Anlagenkonzept entwickelt und umgesetzt. Das Konzept umfasst zwei Prozessebenen (1 und 2), die die Durchführung von Annealing-Prozessen unter den oben genannten Bedingungen ermöglichen. Die obere Prozessebene (1) ermöglicht die Prozessierung unter Normalatmosphäre, während die untere Prozessebene (2) die Bearbeitung unter Vakuumbedingungen (bis 10^{-5} mBar) sowie in definierter Atmosphäre gestattet. Dabei ist das Lasersystem höhenverstellbar, sodass die jeweilige Prozessebene gezielt angefahren werden kann. Diese Höhenverstellbarkeit des Lasersystems ermöglicht eine optimale Anpassung des Arbeitsabstands zwischen den Lasermodulen (VCSEL) und der jeweiligen Prozessebene. Diese Anpassung hat einen signifikanten Einfluss auf die Prozessqualität, insbesondere hinsichtlich der Temperaturhomogenität und der maximal erreichbaren Temperatur. Im Vergleich zur Prozessebene mit der Vakuumkammer bietet die obere Prozessebene unter Luftatmosphäre Vorteile wie eine einfachere Handhabung der Proben, einen erhöhten Durchsatz sowie eine vereinfachte optische Temperaturerfassung.

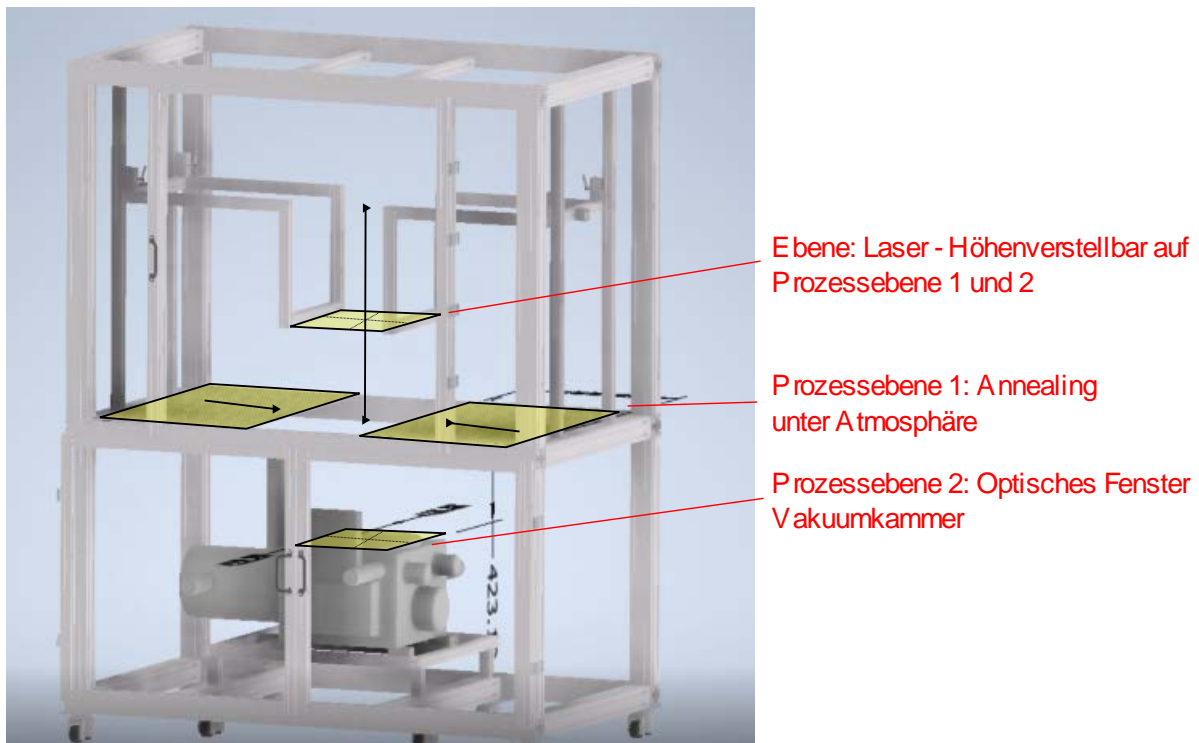


Abbildung 27: Entwickeltes Anlagenkonzept zur Prozessierung unter Normalatmosphäre sowie unter Vakuumbedingungen und definierter Atmosphäre.

In Abbildung 28 sind Farbbildaufnahmen beider Konfigurationen dargestellt. Die zentrale Komponente der Laseranlage ist ein höhenverstellbarer, mittig angeordneter Rahmen (1), der neben den Lasermodulen auch andere wesentliche Komponenten umfasst, darunter eine Infrarotkamera, ein Pyrometer, eine Photodiode und eine Luftkühleinheit. Diese Elemente sind entscheidend für die präzise Überwachung und Steuerung der Heizprozesse. Die in der Bezeichnung 2 dargestellte Konfiguration ist für laserbasierte Heizprozesse unter Luftatmosphäre vorgesehen. Auf der Arbeitsebene, die durch eine Lochrasterplatte repräsentiert wird, sind weitere prozessrelevante Komponenten installiert, wie beispielsweise eine Probenhalterung und Reflektorplatten. Diese Anordnung ermöglicht die Durchführung von Annealing-Prozessen, die insbesondere für TopCON- und Heterojunction-Solarzellen relevant sind, bei Temperaturen von bis zu 900 °C und für Substratgrößen von 20 cm x 20 cm.

Um höhere Temperaturen zu erreichen oder unter Inertgasatmosphäre zu arbeiten, wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vakuumkammer der Firma NTG genutzt. Durch das seitliche Verschieben der oberen Arbeitsebene und das Herunterfahren des Rahmens können die Lasermodule in die Nähe des optischen Fensters der Vakuumkammer oder auf die untere Ebene (3) gebracht werden.

Insgesamt gewährleistet das duale Anlagenkonzept ein breites Anwendungsspektrum, das die effiziente Umsetzung der im Rahmen des Projekts zu untersuchenden Fragestellungen ermöglichte.

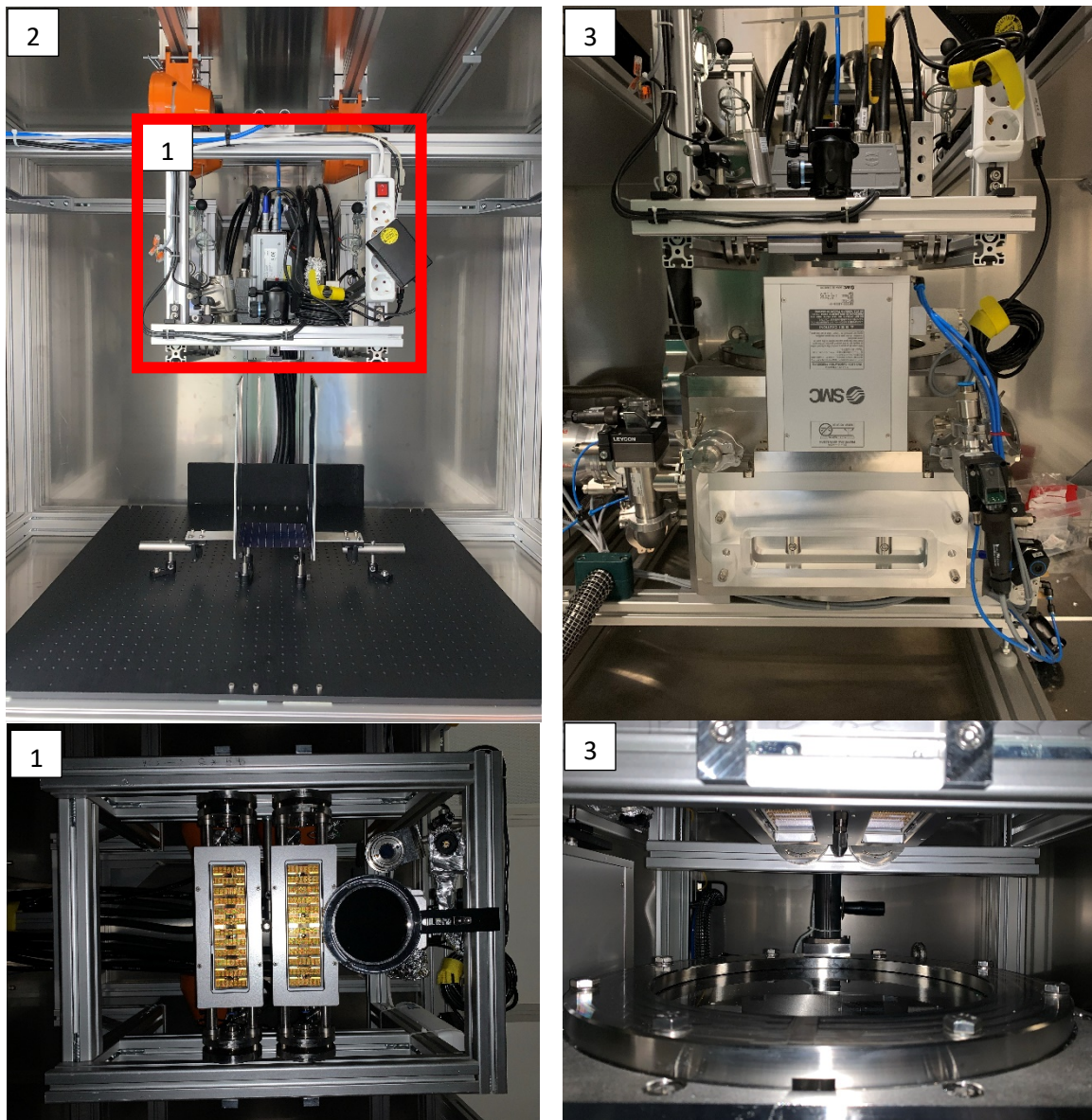


Abbildung 28: Konfigurationen des entwickelten Laseranlagenkonzepts

2.1.5 AP 5 Photonisches Sintern, Curing und Kontakt-Optimierung

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M5.1 Untersuchungen zu IPL-induziertem Light Soaking abgeschlossen und auf Solarzellenniveau demonstriert Schädigungsfreies Curing/Sintern der Metallisierung von SHJ- und Perowskit- Tandem-Solarzellen demonstriert.	Ermittlung von IPL- Parametern für das Curing der Metallisierung von SHJ-Solarzellen. Zellergebnisse vergleichbar mit thermischem Curing.	M22	Neuausrichtung des AP: Fokussierung auf das Curing/ Sintern der Metallisierung aufgrund von großem Interesse der PV-Industrie im Hinblick auf Hocheffizienz-Zellkonzepte (vgl. Zwischenbericht 2 / 2022). Versuche zum IPL-Sintern auf SHJ- Solarzellen erfolgreich abgeschlossen.

Im Versuch wurden das thermische und das IPL-Curing verglichen, um bestmögliche Parameter für den IPL-Prozess zu ermitteln. Als Substrat kamen dabei industrielle Silizium-Heterojunction (SHJ)-Präkursoren zum Einsatz, die mittels Flachbett-Siebdruck metallisiert wurden. Der Versuchsplan ist in Abbildung 52 dargestellt.

Gr. 1	...	Gr. 10	Gr. 11	Gr. 12	Gr. 13
Material – SHJ Präkursoren M2 (156,75 psq 210)					
RS LT-Ag-Siebdruck – Finger 40 μm + BBs Trocknung/Curing 200 °C / 220 °C, 1 min					
VS LT-Ag-Siebdruck – Finger 15-24 μm + BBs					
Trocknung: Ausdampfen unter Abzug					
Variation Curing IPL			Variation Curing Konvektionsofen		
(530-570 V 0.1–0.2 Hz 1-2 ms 1-3 Pulse)			(130/220 °C 1, 2, 5 min)		
Charakterisierung Zelltester: IV-Messung					
Aufnahmen Konfokalmikroskop					

Abbildung 29: Versuchsplan zum Vergleich des Curing mit IPL und Konvektionsofen

Die Präkursoren aller 13 Testgruppen erhielten auf der Rückseite einen Dualdruck von Fingern (Sieböffnung 40 μm) und Busbars und auf der Vorderseite einen Druck mit einem Testlayout mit verschiedenen Fingerbreiten (Sieböffnungen 15 – 24 μm). Dabei wurde eine für SHJ-Zellen ausgelegte, silberbasierte Niedertemperaturpaste verwendet. Nach dem Rückseitendruck fand eine thermische Trocknung/ein thermisches Curing bei 200 °C / 220 °C statt. Um weitere Einflüsse zu vermeiden, wurden die Zellen nach dem Vorderseitendruck nicht mehr thermisch getrocknet. Stattdessen fand eine passive Trocknung an Luft statt.

Anschließend wurden die Gruppen 11 – 13 in einem Konvektionsofen ohne IR-Strahlung gecured. Eine Variation wurde bei der Trocknungstemperatur und -dauer durchgeführt. Für die Gruppen 01 – 10 war ein Curing mittels IPL vorgesehen. Die hierfür anhand von früheren Ergebnissen [9] vorausgewählten Prozessparameter wurden zuvor mithilfe von zusätzlichen Präkursoren mit Testdrucken überprüft. Nach den Ergebnissen dieses Vorversuchs mit Testdrucken wurden die Parameter für das IPL-Curing im Zuge weiterer Tests angepasst. Die wichtigsten Erkenntnisse hierbei waren, dass zwei getrennte Schritte, IPL-Trocknung und IPL-Curing, notwendig sind, um eine vollständige Abriebfestigkeit der aufgedruckten Metallisierungspaste zu erreichen. Außerdem führten zu hohe Belichtungsdauern von über 1,3 ms bei Verwendung der übrigen gewählten Parameter zu einer sichtbaren Schädigung der Zelloberfläche bzw. der Metallisierung. Das IPL-Curing wurde daher schließlich mit den angepassten Parametern (Abbildung

54) durchgeführt. Variiert wurden dabei die an der Blitzlampe anliegende Spannung, die Frequenz und Anzahl der Einzelpulse sowie die Belichtungsdauern.

IPL	t_1	t_2
530 V 0.2 Hz	1 ms	1,25 ms
550 V 0.1 Hz	1 ms	1,25 ms
550 V 0.2 Hz	1 ms	1,25 ms
550 V 0.2 Hz	1 ms	1,25 ms
570 V 0.2 Hz	1 ms	1,25 ms

Je 3 Pulse, Abstand Probentisch: 5 mm, zuvor Trocknung.
 * 1-3 Pulse, Messung dazwischen.

Abbildung 31: Angepasste Parameter für das IPL-Curing.

Die Auswertung der Ergebnisse der IV-Messung (5-Busbar-Messung) zeigt

innerhalb der Gruppen mit IPL-Curing einen deutlichen und konsistenten Einfluss der Belichtungszeit. So erzielten alle Gruppen mit einer Belichtungszeit von 1,25 ms bessere Kennwerte als ihre jeweiligen

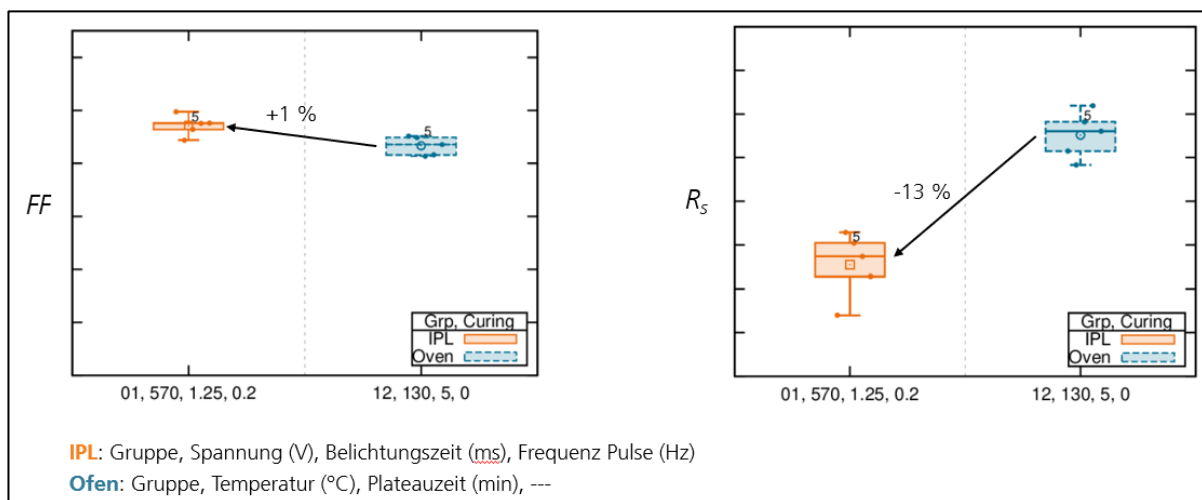


Abbildung 30: Qualitativer Vergleich der Ergebnisse der IV-Messung hinsichtlich Füllfaktor und Serienwiderstand von Gruppe 01 (IPL-Curing) und Gruppe 12 (thermisches Curing im Ultra-Niedertemperaturbereich).

Vergleichsgruppen mit nur 1ms Belichtungszeit (siehe Abbildung 55). Darüber hinaus wurde ersichtlich, dass die

Zellen nach IPL-Curing ein vergleichbares Niveau erreichen wie diejenigen Zellen, die thermisch gecured wurden. Die beste Gruppe nach IPL-Curing (Gruppe 01) lag hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades gleichauf mit der besten Gruppe nach thermischem Curing (Gruppe 13). Im Vergleich mit den thermischen Prozessen bei geringerer Temperatur (Gruppen 11 und 12), welche für die Anwendung bei temperatursensitiven Substraten relevant wird, konnten mit den IPL-

Prozessen bessere Ergebnisse erreicht werden. Dies ist vor allem auf geringere Serien- und Linienwiderstände zurückzuführen. So war der Serienwiderstand der Zellen aus Gruppe 01 im Mittel bis zu 13 % geringer als bei Gruppe 12 (siehe Abbildung 30).

Ein weiterer Versuch auf Silizium-Perowskit-Tandemzellen konnte aufgrund fehlender Verfügbarkeit nicht durchgeführt werden. Die gefundenen Parameter aus dem Versuch auf SHJ-Zellen stellen hierfür jedoch aufgrund der Zellergebnisse geeignete Ausgangswerte dar.

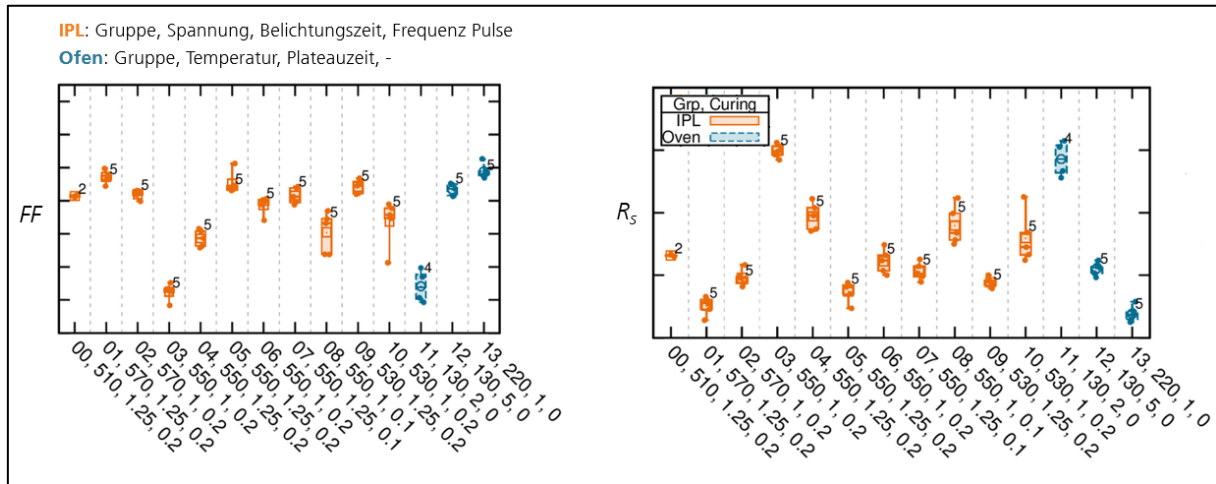


Abbildung 32: Qualitativer Vergleich aller Gruppen hinsichtlich Füllfaktor und Serienwiderstand. Die Zellen mit IPL-Curing (orange) zeigen eine Verbesserung der Kennwerte bei Verwendung einer längeren Belichtungszeit.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat über die zentrale Verwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft. Im Folgenden werden die wichtigsten Positionen dargelegt:

Pos.	Investitionsposten	Begründung für Bedarf
1	Raman/PL Upgrade	Zur Charakterisierung von Materialien mit großer Bandlücke, wie TCOs, wurde eine Erweiterung des Raman/PL Aufbaus zur Anregung mit kürzeren Wellenlängen benötigt
2	Vakuum-Prozesskammer	Eine Vakuumkammer wurde benötigt, um vollflächige Laser-Heizprozesse ohne den Einfluss der Atmosphäre durchführen zu können. Durch Eliminierung von Konvektionsverlusten während des Heizens werden höhere Heizraten, höhere Maximaltemperatur und bessere Homogenität erwartet. Außerdem kann in der Kammer ungewollte Oxidation durch die Abwesenheit von Sauerstoff und unter Zuhilfenahme von Prozessgasen unterdrückt werden.
3	Al2O3-Vakuumfenster	Damit Laserstrahlung in die Kammer gelangen kann, wird ein bei der Laserwellenlänge transparentes und außerordentlich stabiles Fenster benötigt. Hierzu wurde Al2O3 („Saphir“) als geeignetstes Material identifiziert (siehe Abschnitt in 2.1.4)

2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der im Projekt „PhocoHila“ durchgeführten Arbeiten ergibt sich unmittelbar aus den aktuellen Herausforderungen bei der Herstellung moderner Bauelemente in der Photovoltaik- und Halbleiterindustrie. Mit dem Übergang zu Hocheffizienz-Solarzellen wie SHJ- und Perowskit/Silizium-Tandemzellen steigen die Anforderungen an die thermische Behandlung von Schichten und Kontakten erheblich. Konventionelle Ofentechnologien stoßen hier an physikalische und technologische Grenzen: Sie ermöglichen keine selektive, schicht- oder orts aufgelöste Wärmebehandlung und sind zudem energetisch ineffizient. Die Vorgaben in den Prozessflüssen, aufgrund den Wärmeanforderung von einzelnen aktiven Schichten und maximalem Wärmebudgets anderer Schichten

sind zunehmend einschränkend. Gerade für temperatursensitive Schichtsysteme, wie sie in modernen und zukünftigen Solarzellen zum Einsatz kommen, ist eine gezielte, schonende und zugleich hochdynamische Prozessführung erforderlich.

Die im Projekt entwickelten photonischen Verfahren – insbesondere laserbasiertes Annealing, Rapid Thermal Processing und IPL-Sintern – adressieren diese Anforderungen direkt. Sie ermöglichen erstmals eine selektive, schnelle und flexible Wärmebehandlung einzelner Funktionsschichten, ohne das gesamte Bauteil thermisch zu belasten. Dies ist für die Herstellung und Optimierung von Hocheffizienz-Solarzellen und anderen Halbleiterbauelementen essentiell, da nur so die gewünschten Materialeigenschaften und hohen Wirkungsgrade erreicht werden können. Die Arbeiten waren zudem notwendig, um die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen besser zu verstehen und die Prozessfenster für industrielle Anwendungen zu definieren.

Die öffentliche Förderung des Projekts war notwendig, da die Entwicklung und Erprobung innovativer photonischer Verfahren mit hohem Forschungs- und Investitionsrisiko verbunden ist, das von Unternehmen allein nicht getragen werden kann. Die Ergebnisse bieten einen breiten gesellschaftlichen und industriellen Nutzen, indem sie die Produktion hocheffizienter Solarzellen ermöglichen, zur Energiewende beitragen und den Technologiestandort Deutschland stärken. Gleichzeitig fördert das Projekt die Ausbildung von Fachkräften, den Wissenstransfer sowie nachhaltige und ressourcenschonende Produktionsmethoden. Nur durch öffentliche Unterstützung können diese Innovationspotenziale erschlossen und langfristig gesichert werden.

Die Angemessenheit der geleisteten Arbeit zeigt sich auch in der konsequenten Umsetzung der Projektziele: Die Entwicklung neuer Prozessrouten, die prototypische Umsetzung einer laserbasierten RTP-Anlage und die umfassende Charakterisierung der Materialsysteme wurden systematisch und zielgerichtet bearbeitet. Die erzielten Ergebnisse belegen, dass die gewählten Ansätze geeignet sind, die bestehenden Limitierungen zu überwinden und neue Innovationspotenziale für die deutsche und internationale Photovoltaik-Industrie zu erschließen.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt erzielten Ergebnisse sind sowohl wissenschaftlich als auch wirtschaftlich verwertbar und bieten einen unmittelbaren Nutzen für Forschung und Industrie. Die entwickelten photonischen Prozessrouten (z.B. laserbasiertes Annealing für TCOs und amorphe Siliziumschichten, Rapid Thermal Processing mit Vakuumkammer, IPL-Sintern für Kontakte) können in die Entwicklungsrouten für Hocheffizienz-Solarzellen integriert werden. Damit wird es möglich, die Effizienz, Flexibilität und Energieeffizienz der Produktion signifikant zu steigern und neue Zellkonzepte mit empfindlichen Schichtsystemen industriell umzusetzen. Durch die entkoppelte Behandlung einzelner Schichten, ohne das gesamte Device der Wärmebelastung auszusetzen, sind neue Prozessketten denkbar, die bisher nicht betrachtet wurden.

Ein besonderer Mehrwert ergibt sich aus der Übertragbarkeit der Verfahren auf verschiedene Materialsysteme und Anwendungsfelder: Die im Projekt demonstrierten Prozesse sind nicht auf einzelne Zelltypen beschränkt, sondern können auch für andere Halbleiter- und optoelektronische Bauelemente adaptiert werden. Die prototypisch entwickelte laserbasierte RTP-Anlage steht als Demonstrator für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Verfügung und kann von Industriepartnern für Prozessoptimierung und Upscaling genutzt werden.

Der globale RTP-Equipment-Markt zeigt eine dynamische Entwicklung mit einem prognostizierten Wachstum 8,2% bis 2034 [10]. Die in diesem Projekt entwickelten technologischen Lösungen können direkt dazu beitragen, die beteiligten Unternehmen und zukünftige Partner zu stärken und Alleinstellungsmerkmale in diesem wachsenden Markt zu bieten.

Die im Projekt gewonnenen Daten und Methoden werden in Folgeprojekten mit Industriepartnern weiterentwickelt, in wissenschaftlichen Publikationen verbreitet oder werden als Basis für Schutzrechte und Lizenzen dienen.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse – etwa zum Zusammenhang von Laserparametern, Materialstruktur und elektrischen Eigenschaften – liefern eine wichtige Grundlage für weitere Innovationen und sichern die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Forschungsstandorts Deutschland.

2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der Durchführung des Vorhabens PhocoHila sind wissenschaftliche und technische Fortschritte auf dem Gebiet photonischer Prozesse zum Heizen von Halbleiterbauelementen bei anderen Stellen weltweit bekannt geworden.

Die laserunterstützte Kontaktbildung (LECO) hat sich während des Projektzeitraums als revolutionäre Technologie, vor allem für TOPCon-Solarzellen mit großer Marktdurchdringung etabliert [11].

Back-Contact-Zellkonzepte haben während des Projektzeitraums an Marktanteilen gewonnen und sind in breiter industrieller Umsetzung. Laser-Annealing-Konzepte zur lokalen Aktivierung sind darin häufig enthalten [12]. LONGi Green Energy erzielte 2024 Effizienzrekord von über 27% mit monokristallinen Back-Contact-Solarzellen. Dieser wurde durch vollständig laserstrukturierte Verfahren und indiumarme Metallisierungsansätze ermöglicht [13].

Die IPL-Technologie hat wichtige Fortschritte in der flexiblen Elektronik erzielt. Forscher demonstrierten 2022 erfolgreich die Kombination von IPL mit Roll-to-Roll-Slot-Die-Beschichtung für die Herstellung flexibler Perowskit-Solarzellen mit Geschwindigkeiten von bis zu 2m/min [14].

Coherent entwickelte 2023 mit dem PYTHON ein diodengepumpte Festkörperlasersystem das Laser-Annealing wie mit Excimer Laser-Annealing in der in der OLED-Produktion eingesetzt wird und das eine starke Reduktion der Betriebskosten ermöglichen soll [15].

Diodenlaser mit mehreren 10kW Leistung werden zunehmend zur großflächigen Wärmebehandlung eingesetzt, beispielsweise zum Trocknen von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien [16].

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Poster

A. Münzer, M. Weittenhiller, F. Meyer, S. W. Glunz,
Rapid Laser Annealing of Transparent Conductive Oxides on Temperature-Sensitive Solar Cell Structures,
40th EU PVSEC, Lisbon, 2023.

A. Münzer, M. Weittenhiller, F. Meyer, S. W. Glunz,
Rapid Laser Annealing of Transparent Conductive Oxides on Temperature-Sensitive Solar Cell Structures,
8th Venice International School on Lasers in Materials Science (SLIMS), Venice, 2024

A. Münzer, L. Tutsch, M. Weittenhiller, M. Bivour, F. Meyer, S. W. Glunz,
Selective UV Laser Induced Annealing Mechanisms of TCO Thin Films, *Conference on Laser Ablation COLA 2024*, Hersonissos (Crete), 2024

Vorträge

A. Münzer, *Photonic Thin Film Annealing Processes for Solar Cells*, Silicon Forest 2022

S. Roder et al., *Laser-based heat treatments to stabilize and increase the efficiency of solar cells*, Silicon Forest, 2024.

S. Roder et al., *Laser-based heat treatments in photovoltaics*, RTP-Nutzertreffen, Dresden, 2024.

S. Roder, J. Schneider, A. Brand and J. Nekarda, *Advanced modeling of temperature-dependent phenomena in solar cell manufacturing utilizing the full dynamics of heat-up and cool-down profiles*, 35th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2024.

S. Roder et al., *Laser-based heating: selective and global heating strategies*, Heißprozesse und RTP, Blaubeuren, 2025.

Journal-Veröffentlichungen

A. Münzer, M. Weittenhiller, M. Bivour, F. Meyer, S. W. Glunz,
Effects of UV ns Laser Annealing on the Electrical and Microstructural Properties of Indium-Based Transparent Conductive Oxides, *Solid Films*, Elsevier, 2025, *accepted for publication*

Referenzen

- [1] T. Sameshima, S. Usui, und M. Sekiya, „XeCl Excimer laser annealing used in the fabrication of poly-Si TFT's“, *IEEE Electron Device Lett.*, Bd. 7, Nr. 5, S. 276–278, Mai 1986, doi: 10.1109/EDL.1986.26372.
- [2] M. Matsumura, „Application of Excimer-Laser Annealing to Amorphous, Poly-Crystal and Single-Crystal Silicon Thin-Film Transistors“, *Phys. Status Solidi A*, Bd. 166, Nr. 2, S. 715–728, Apr. 1998, doi: 10.1002/(SICI)1521-396X(199804)166:2<715::AID-PSSA715>3.0.CO;2-L.
- [3] J. Haschke u. a., „Annealing of Silicon Heterojunction Solar Cells: Interplay of Solar Cell and Indium Tin Oxide Properties“, *IEEE J. Photovolt.*, Bd. 9, Nr. 5, S. 1202–1207, Sep. 2019, doi: 10.1109/jphotov.2019.2924389.
- [4] A. T. Fiory, „Recent developments in rapid thermal processing“, *J. Electron. Mater.*, Bd. 31, Nr. 10, S. 981–987, Okt. 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0031-9.
- [5] T. Druffel, R. Dharmadasa, B. W. Lavery, und K. Ankireddy, „Intense pulsed light processing for photovoltaic manufacturing“, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 174, S. 359–369, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.09.010.
- [6] J. Schube u. a., „Intense pulsed light in back end processing of solar cells with passivating contacts based on amorphous or polycrystalline silicon layers“, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 216, S. 110711, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110711.
- [7] W.-E. Hong und J.-S. Ro, „Kinetics of solid phase crystallization of amorphous silicon analyzed by Raman spectroscopy“, *J. Appl. Phys.*, Bd. 114, Nr. 7, S. 073511, Aug. 2013, doi: 10.1063/1.4818949.
- [8] F. Meyer, „Impact of solidification dynamics on crystal properties of silicon molten by a nanosecond laser pulse“, gehalten auf der Conference on Laser Ablation, Marseille, 8. September 2017.
- [9] J. Schube, „Metallization of Silicon Solar Cells with Passivating Contacts“, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2020.
- [10] „Global Rapid Thermal Annealer Market Research Report By Product Type (Batch Rapid Thermal Annealer, Inline Rapid Thermal Annealer), – Forecast to 2034.“, Exactitude Consultancy. [Online]. Verfügbar unter: <https://exactitudeconsultancy.com/global-rapid-thermal-annealer-market>
- [11] J. P. Casey, „Laser-assisted firing 'biggest innovation' in solar cell technology for two years“, PV Tech. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv-tech.org/laser-assisted-firing-biggest-innovation-solar-cell-technology-two-years/>
- [12] J. Linke u. a., „Fully passivating contact IBC solar cells using laser processing“, in *Proc. of 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion WCPEC, 2022*
- [13] G. Wang u. a., „27.09%-efficiency silicon heterojunction back contact solar cell and going beyond“, *Nat. Commun.*, Bd. 15, Nr. 1, Okt. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-53275-5.
- [14] P. S. Chandrasekhar, S. Chapagain, M. Blake, P. J. Armstrong, C. Grapperhaus, und T. L. Druffel, „Rapid scalable fabrication of roll-to-roll slot-die coated flexible perovskite solar cells using intense pulse light annealing“, *Sustain. Energy Fuels*, Bd. 6, Nr. 23, S. 5316–5323, 2022, doi: 10.1039/d2se00911k.
- [15] „A Solid Advance in OLED Display Production | Coherent“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.coherent.com/news/blog/python>
- [16] „Diode Laser Drying of Electrodes for Lithium-Ion Batteries : Paving the way for energy efficient ... | PEM | RWTH Aachen University | DE“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/pem/forschung/publikationen/~feeo/publikationen-einzelansicht/?file=959483>

3. Anlagen

3.1 Erfolgskontrollbericht

3.2 Berichtsblatt