

Öffentlicher Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

" Produktionstechnologien für hochperformante kostengünstige IBC-Solarzellen"

Akronym "POPEI"

Teilvorhaben des Fraunhofer ISE: Frontend- Technologien IBC1

Förderkennzeichen: 03EE1102G

Projektlaufzeit: 01.05.2021 - 30.10.2023

Berichterstattung:

Andreas Wolf, Jana-Isabelle Polzin, Stefan Schmidt, Katrin Krieg,
Sebastian Nold

Freiburg, 02.07.2024

Zuwendungsempfänger und ausführendes Institut:

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Tel. 0761 4588 -5580; Fax 0761 4588 -9250

E-Mail: andreas.wolf@ise.fraunhofer.de

Projektleiter: Dr. Andreas Wolf

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EE1102G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Aufgabenstellung, Zielsetzung und Voraussetzungen	5
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
3.1	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn.....	6
3.2	Fortschritt auf dem Gebiet während des Vorhabens	7
4	Erzielte Ergebnisse	8
4.1	AP 1 Entwicklung PECVD-Anlage für polySi-Abscheidungen.....	8
4.2	AP 2 Entwicklung IBC1 Front-End.....	8
4.3	AP 5 Entwicklung HF/HCl/O3 Reinigung.....	16
4.4	AP 10 Techno-ökonomische Analysen	16
5	Veröffentlichungen	17
6	Literaturverzeichnis	17

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts konnte der Kenntnisstand in den Bereichen Diffusions- und Dotierungsprozesse für p-Typ IBC Solarzellen bedeutend weiterentwickelt werden. Zentrale Prozessbausteine dieses Teilvorhabens waren dabei die POCl_3 -Diffusion für die Herstellung des Front Floating Emitters (FFE) und gleichzeitiger Kristallisation der Si-Schicht, sowie die plasmaunterstützte Gasphasenabscheidung (PECVD) Abscheidung von Phosphor-dotierten Si-Schichten für Tunneloxid passivierende Kontakt (TOPCon)-Strukturen als rückseitigen Emitter. Eine weitere Aufgabe bestand in der Integration dieser Prozesse in den Gesamtprozess der IBC1-Solarzelle, welche in enger Kooperation mit den Projektpartnern ISC Konstanz und centrotherm erfolgte.

Im Bereich der Prozessentwicklung der POCl_3 -Diffusion wurden intensive Arbeiten durchgeführt. Es wurden insgesamt über 80 POCl_3 -Prozessrezepte erstellt, gefahren und an Teststrukturen charakterisiert. Die Entwicklungen führten zu einem industriell anwendbaren Prozess, welcher Sättigungsstromdichten des FFE im Bereich $j_{0e} = 12 \text{ fA/cm}^2$ bei einem Schichtwiderstand von $R_{sh} \approx 1000 \text{ } \Omega/\text{sq}$ ermöglichte (texturierte Oberfläche, SiO_2/SiNx -passiviert, gefeuert). Trotz des hohen Schichtwiderstands zeichnet sich dieser Prozess durch eine gute Homogenität der Dotierung über den Wafer und über das voll beladene Prozessboot, eine gute Reproduzierbarkeit, sowie eine industriell umsetzbare Prozesszeit von unter 90 Minuten aus. In Kombination mit einem TOPCon-basierten rückseitigen Emitter konnten mit diesen POCl_3 -Prozessen auf Solarzellen-Vorläufer-Teststrukturen implizite Spannungen von $iV_{oc} \approx 725 \text{ mV}$ demonstriert werden (Ga-dotierte Cz-Si Wafer, $0,6 \text{ } \Omega\text{cm}$).

Im Bereich der PECVD Abscheidung von Phosphor-dotierten Si-Schichten wurden Untersuchungen zur Sättigungsstromdichte im nicht-metallisierten und metallisierten Bereich durchgeführt, wobei die Metallisierung mittels Siebdrucks und Sintern (Feuern) von Ag-basierten Pasten erfolgte. Es wurden für einige Prozessgruppen niedrige Sättigungsstromdichten $j_{0,pas}$ der TOPCon-Schicht im Bereich von 4 bis 5 fA/cm^2 gemessen, für Emitter-Strukturen auf p-Typ Substrat lagen die Werte im Bereich $j_{0,pas} \approx 7 \text{ fA/cm}^2$. Für die Sättigungsstromdichten $j_{0,met}$ im metallisierten Bereich der TOPCon-Schicht wurden die niedrigsten Werte im Bereich 40 bis 50 fA/cm^2 gemessen. Für Emitter-Strukturen auf p-Typ Substrat lagen die Werte im Bereich $j_{0,met} \approx 100 \text{ fA/cm}^2$.

Die Integration in den Gesamtprozess der IBC1-Solarzelle erfolgte in enger Kooperation mit den Projektpartnern ISC Konstanz und centrotherm, am Fraunhofer ISE wurden die Frontend-Prozesse einseitige Textur, PECVD-Abscheidung der dotierten Si-Schicht, sowie POCl_3 -Diffusion zur Kristallisation der Si-Schicht und Ausbildung des FFE durchgeführt, sowie einzelne Tests für alternative Vorderseitenpassivierung basierend auf $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiNx}$ -Schichtsystemen. Insgesamt wurden mit dem ISC Konstanz 8 Solarzellenexperimente durchgeführt und die neuen Entwicklungen im Bereich der Einzelprozesse dort eingepflegt. Dabei wurden Spitzenwirkungsgrade von knapp 23% bei Spannungen von bis zu $V_{oc} = 710 \text{ mV}$ erreicht. Die hergestellten Solarzellen zeigten eine Instabilität (Steigerung des Wirkungsgrades unter Beleuchtung), die im Projektverlauf auch bei anderen p-Typ basierten Zellstrukturen beobachtet wurde und welche Gegenstand weiterer Untersuchungen ist.

Es konnten im Laufe des Projektes alle Meilensteine erreicht werden. Es wurden 2 Konferenzbeiträge aus dem Projekt mit Zuarbeit des Fraunhofer ISE geleistet. Die Ergebnisse werden in verschiedenen laufenden Projekten weiterentwickelt und die Verwertung in Industrieprojekten ist angebahnt und in Teilen bereits laufend.

2 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Voraussetzungen

Die Zielsetzung des Teilvorhabens wurde in der Vorhabenbeschreibung wie folgt definiert, für eine detaillierte Einordnung der Arbeiten am Fraunhofer ISE in das Gesamtvorhaben wird auf die Gesamtvorhabenbeschreibung verwiesen.

Im Teilvorhaben des Fraunhofer ISE sollen die Frontend-Technologien für den angestrebten Prozessfluss „IBC 1“ entwickelt werden. Diese Aktivitäten sind im AP1 und AP2 des Projektes angesiedelt. In AP1 erfolgt die Unterstützung des Projektpartners centrotherm bei der Anlagenentwicklung. Die wichtigsten Ziele in AP2 am Fraunhofer ISE sind die Entwicklung von Einzel-Prozessen und Prozessbausteinen für

- PECVD-Abscheidung von Phosphor-dotierten Si-Schichten für TOPCon-Strukturen als rückseitiger Emitter in der p-Typ IBC 1 Solarzelle
- POCl_3 -basierter Prozess zur simultanen Diffusion des Front Floating Emitter (FFE) und Kristallisation der TOPCon-Schicht

sowie die Integration dieser Prozessbausteine in den im Gesamtvorhaben angestrebten IBC 1 Prozessfluss

In AP5 unterstützt das ISE den Projektpartner RENA bei der Evaluierung von nasschemischen Reinigungsprozessen. Darüber hinaus sollen die technologischen Entwicklungen in AP2 und AP3 mittels techno-ökonomischer Instrumente bewertet werden, was in AP10 erfolgt. Ziel ist hier eine Kostenbewertung des Prozessfluss IBC 1 im Vergleich zu einem PERC-Prozess.

Die wesentlichen wissenschaftlich/technischen Ziele des Vorhabens sind im Folgenden stichpunktartig dargestellt:

- TOPCon-Strukturen erzielen Dunkelsättigungsstromdichten von $< 6 \text{ fA/cm}^2$ auf texturierten Oberflächen im unmetallisierten und mit $< 350 \text{ fA/cm}^2$ im metallisierten Bereich (poly-Silizium-Schichtdicke $< 200 \text{ nm}$)
- Die Simultane Diffusion des FFE und Kristallisation der TOPCon-Schicht ermöglicht Dunkelsättigungsstromdichten $j_{\text{OFFE}} < 20 \text{ fA/cm}^2$ (texturiert, $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ passiviert, gefeuert), Prozesszeit maximal 90 Minuten
- Metallisierter Solarzellen-Vorläufer erreicht pseudo-Füllfaktor von $> 83\%$

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Der wissenschaftliche und technische Stand zu Projektbeginn ist ausführlich im Projektantrag aufgeführt.

Tunneloxid und TOPCon Schichtabscheidung

Die Eigenschaften von passivierenden Kontakten sind bereits seit Jahrzehnten als Halbleiter-Anwendungen bekannt [1, 2]. Am Fraunhofer ISE wurde die Technologie für beidseitig kontaktierte Solarzellen in den vergangenen Jahren weiterentwickelt [3], aktuell werden auf kleinen Flächen Wirkungsgrade bis 26,0% erreicht. Inzwischen haben führende asiatische Zellhersteller bereits Pilot-Produktionen aufgebaut und erreichten damit zu Projektbeginn Wirkungsgrade größer 23% auf vollformatigen mit Siebdruck kontaktierten Solarzellen [4]. Die TOPCon Struktur, welches aus einem 1-2 nm dünnem Tunneloxid und einer ca. 150-200 nm dicken, dotierten poly-Si-Schicht besteht, wurde damals in der Industrie mittels „low pressure chemical vapor deposition“ (LPCVD) hergestellt, da dieses Verfahren eine hohe Technologiereife aufweist und die Abscheidung von Tunneloxid und poly-Si in einer Anlage ermöglicht. Von Nachteil sind die inhärent beidseitige Beschichtung, welche eine Integration in einen schlanken Zellprozess erschwert sowie die geringe Abscheiderate, welche stark von der Abscheidetemperatur abhängt. Alternative Verfahren zu LPCVD sind PECVD [5], chemische Abscheidung bei Atmosphärendruck (APCVD) [6] und Sputtern [7], welche einseitig den Wafer beschichten, jedoch auch einen gewissen Kantenumgriff aufweisen können. In der Literatur fanden sich damals bereits viele Beiträge zur Realisierung von TOPCon-Schichten mittels PECVD [5, 8–12] und es wurden bereits TOPCon Solarzellen mit PECVD Technologie hergestellt [13]. Ein Vorteil von PECVD gegenüber LPCVD ist die höhere Abscheiderate, zudem existiert die Möglichkeit, Schichten mit Kohlenstoff bzw. Sauerstoff zu legieren. Nachteilig ist der Einbau von Wasserstoff, welcher zum Blistern der Schichten führen kann. Eine große Herausforderung bei PECVD bestand jedoch in der Hochskalierung dieser Technologie, da die verwendeten Boote für die Abscheidung leitfähiger Schichten nicht ausgelegt waren. So wurden die einzelnen Platten mit fortwährender Prozesszeit kurzgeschlossen, da die isolierenden Keramik-Spacer mit zunehmender Beschichtung ihre isolierende Wirkung verlieren. Lösungsansätze dafür konnten bereits am ISE prinzipiell gezeigt werden. Dennoch stand der erfolgreiche Übertrag auf ein industriell verwendetes Design noch aus. Ein weiterer wichtiger Entwicklungspunkt ist die Realisierung einer komplett einseitigen Abscheidung ohne Kantenumgriff, welche ggf. durch Anpassung des Plattendesigns realisiert werden kann.

Zur Wasserstoff-Passivierung des TOPCon-Systems werden üblicherweise PECVD-Deckschichten aus SiN_x , evtl mit weiteren Schichten wie SiO_xN_y oder AlO_x , eingesetzt [14–16]. Diese ermöglichen die Wasserstoff-Passivierung während des Kontaktfeuer-Schrittes. Für bifaziale Anwendungen sollten die Schichtsysteme die entsprechenden Eigenschaften haben.

POCl_3 -Diffusion und Oberflächenpassivierung

Zur Herstellung des pn-Übergangs für p-Typ PERC Solarzellen wurde fast ausschließlich Phosphor-Diffusion in Rohröfen unter Verwendung von Phosphoroxychlorid POCl_3 als Dotierstoffquelle angewandt. Die POCl_3 -Technologie ist schon seit vielen Jahrzehnten in der Halbleiterfertigung etabliert und hat sich auch in der Solarzellenfertigung als Standardprozess zur Phosphor-

Dotierung durchgesetzt. Aktuell findet die POCl_3 -Diffusion zunehmend Anwendung zur Phosphor-Dotierung intrinsisch abgeschiedener Si-Schichten bei TOPCon Solarzellen [17]. Hier werden deutlich stärkere Dotierungen benötigt als für die Emitter-Bildung bei PERC-Solarzellen.

Die Anlagenentwicklung der POCl_3 -Rohröfen hat in den vergangenen Jahren zu starken Kostensenkungen geführt, insbesondere der Durchsatz der Anlagen wurde weiter gesteigert. Die Niederdruck-Diffusion (engl: *low pressure*, LP) ist mittlerweile Stand der Technik [18]. Ansätze zur weiteren Durchsatzsteigerung und Prozessverbesserung wurden am Fraunhofer ISE im Projekt POLDI (FKZ 0324079D) intensiv untersucht und erfolgreich demonstriert. Die entwickelten Ansätze bieten auch Vorteile in Bezug auf eine homogene Dotierung über die Waferoberfläche und das gesamte Prozessboot, was einer Vergrößerung des Prozessvolumens und dem Trend zu größeren Waferformaten entgegenkommt.

Die Passivierung des Emitters erfolgt bei PERC Solarzellen häufig mittels eines Schichtsystems bestehend aus einem wenige nm dünnen thermischen Oxid und einer SiN_x antireflex-Schicht. Dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Oberflächenrekombination von der Dotierkonzentration an der Oberfläche [19]. Reduzierte Oberflächenkonzentrationen ermöglichen es die Rekombination an der Oberfläche stark zu reduzieren. Dies Potential kann bei PERC Solarzellen allerdings nicht voll ausgeschöpft werden, da hier noch eine Kontaktierung des Emitters erfolgen muss und Kontaktwiderstand und Rekombination am Metallkontakt ebenfalls von der Oberflächenkonzentration beeinflusst sind. Für Anwendungen als „floating emitter“, wie in diesem Vorhaben, können sehr niedrige Oberflächenkonzentration verwendet werden. Hier müssen allerdings auch Wechselwirkungen des Si-Wafers mit dem Hochtemperaturprozess, wie z.B. Gettern [20] und die Bildung von Sauerstoff-Präzipitaten [21] berücksichtigt werden sowie die Anforderungen der TOPCon-Schicht.

Die Passivierung der PERC Rückseite erfolgt mittels komplexen Schichtsystemen die z.B. aus $\text{SiO}_2/\text{AlO}_x/\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{SiN}_x$ -Schichten bestehen können [22]. Diese ermöglichen eine sehr gute Oberflächenpassivierung, verhindern das Eindringen der rückseitigen Al-Paste während des Kontaktfeuerns und dienen auch als interner optischer Spiegel.

3.2 Fortschritt auf dem Gebiet während des Vorhabens

Zu Projektbeginn hatten IBC-Solarzellen noch keine nennenswerten Marktanteile. Im Projektverlauf haben einige große Zellhersteller das Konzept erprobt in Pilotlinien bzw. auch in Produktion gebracht und dabei hohe Wirkungsgrade erzielt [23, 24]. Allerdings wurden auch mit beidseitig kontaktierten TOPCon-Solarzellen weitere Fortschritte erzielt und diese Technologie hat die Dominanz im Markt im Projektverlauf deutlich ausgebaut. Die Ausrichtung der Projektinhalte auf Prozessbausteine, die zum Teil auch für beidseitig kontaktierte TOPCon Solarzellen benötigt werden, insbesondere die PECVD-Abscheidung von dotierten Si-Schichten, hat sich also bewährt. Im Laufe des Projektes wurden bei p-Typ Solarzellen mit passivierenden Kontakten Instabilitäten unter Beleuchtung beobachtet, was sich mit Beobachtungen in anderen Projekten am Fraunhofer ISE [25] und mit Angaben von Herstellern von p-Typ IBC Solarzellen deckt [24]. Diese Beobachtung stellt derzeit eine wesentliche Fragestellung für p-Typ Solarzellen mit passivierenden Kontakten dar und wird unter anderem im Folgeprojekt OLIVIA (FKZ 03EE1184B) bearbeitet.

4 Erzielte Ergebnisse

4.1 AP 1 Entwicklung PECVD-Anlage für polySi-Abscheidungen

Dieses AP wurde vom Koordinator centrotherm geleitet. Es gab im Rahmen des Projektes einen Austausch mit centrotherm zum Anlagendesign für die Abscheidung von leitfähigen Schichten. Die darauf basierenden Anpassungen am ISE haben die Anlagenverfügbarkeit für die Projektarbeit am ISE deutlich erhöht. Weitere Details sind dem Bericht des Projektpartners centrotherm zu entnehmen.

4.2 AP 2 Entwicklung IBC1 Front-End

Entwicklung $POCl_3$ -Prozess

Solarzellen-Simulationen beim Projektpartner ISC hatten gezeigt, dass eine niedrige Ladungsträger-Rekombination ausschlaggebend für den Einfluss des front floating emitter (FFE) auf die Solarzelleneffizienz ist. Fokus der Entwicklungen im Projekt war daher, eine niedrige Sättigungsstromdichte des FFE zu erzielen, welche durch niedrige Oberflächenkonzentrationen und hohe Schichtwiderstände erreicht werden sollten. Dazu wurden unterschiedliche Rezepte erstellt, gefahren und an Teststrukturen charakterisiert. Ausgewählte Prozesse wurden auch in Solarzellenchargen integriert.

Ziel der weiteren Prozessentwicklung waren folgende Eigenschaften des FFE und des Prozesses (siehe auch Meilenstein 2.2)

- Sättigungsstromdichte j_{0e} möglichst niedrig
- Homogenes Prozessergebnis über Wafer und Prozessboot
- Prozesszeit maximal 90 Min
- Peak-Temperatur für Anneal TOPCon Schicht möglichst entkoppelt von Schichtwiderstand R_{sh}

Zunächst wurde die Peak-Temperatur und -Zeit fixiert, so dass die gewünschte Kristallisation der TOPCon Schicht wie gewünscht erfolgt. Zur Einstellung des Schichtwiderstands können dann Prozessparameter während bzw. nach der PSG-Schichtabscheidung verwendet werden.

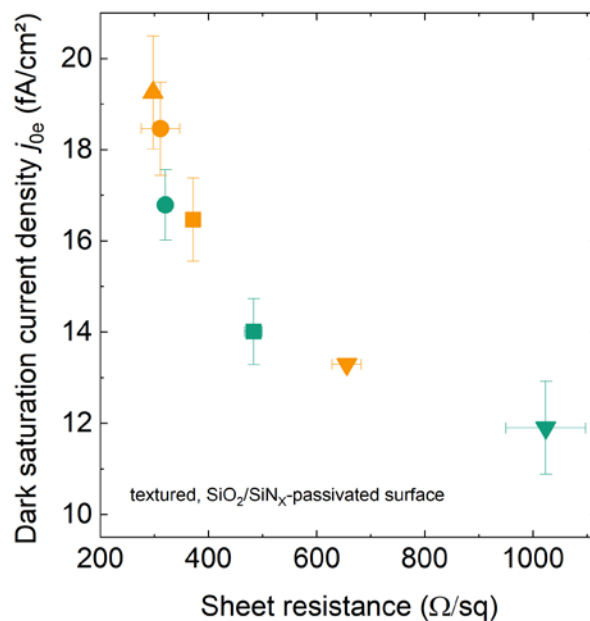


Abbildung 1: Sättigungsstromdichte j_{0e} des FFE gemessen nach Passivieren und Feuern an fünf Stellen pro Wafer und bei 2 Wafern je Prozess, aufgetragen über den induktiv bestimmten Schichtwiderstand der Proben.

Abbildung 1 zeigt die mittels QSSPC bestimmte Sättigungsstromdichte j_{0e} des FFE über den Schichtwiderstand. Mit der beschriebenen Prozessvariation konnten Werte von 12 fA/cm² bei einem Schichtwiderstand von > 1000 Ω/sq demonstriert werden. Im Rahmen der Solarzellen-Prozessierung wurden Variationen des POCl₃-Prozesses auch in Zellchargen implementiert. Damit konnte für ein neues Rezept eine Steigerung im Wirkungsgrad erzielt werden im Vergleich zum bisher verwendeten Rezept. Im weiteren Projektverlauf wurde der POCl₃-Prozess zur gleichzeitigen Diffusion des FFE und Kristallisation der TOPCon Schicht weiter untersucht. Dazu wurden weitere Rezepte erstellt, gefahren und an Teststrukturen charakterisiert. Die Entwicklungen dienen dem Ziel die Plateau-Temperatur T_p nach den Anforderungen der TOPCon-Schicht anpassen zu können, ohne dabei den Schichtwiderstand des FFE stark zu beeinflussen. In einem ersten Experiment wurde daher die Plateau-Temperatur bei konstanter Plateau-Zeit variiert, Abbildung 2 (links) zeigt den gemessenen Schichtwiderstand des FFE, rechts sind die entsprechenden Dotierprofile dargestellt.

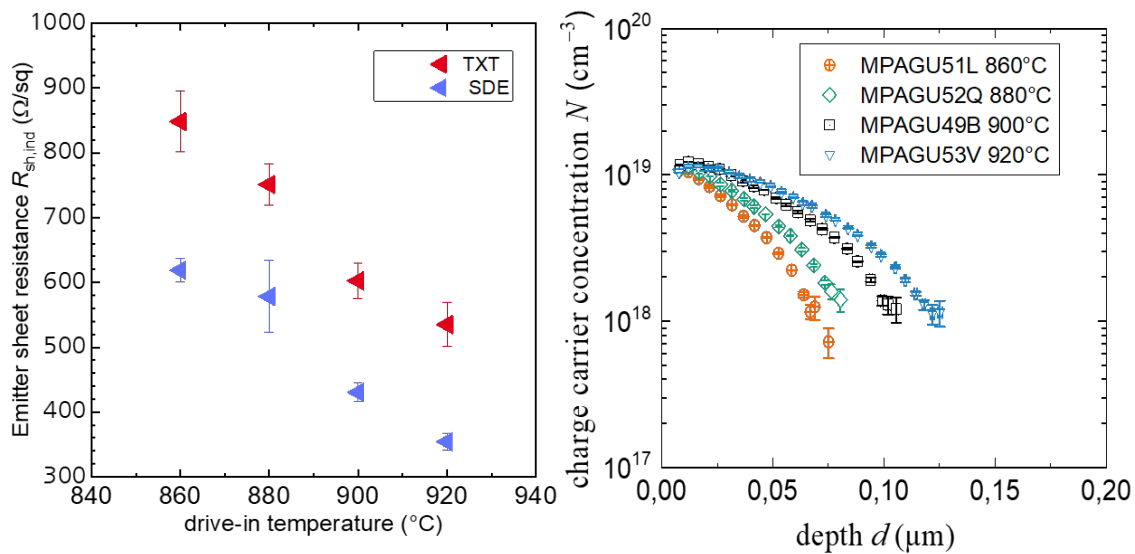


Abbildung 2: Schichtwiderstand (links) und Dotierprofile (rechts) des FFE bei Variation der Plateau-Temperatur T_p bei konstanter Plateau-Zeit. Die Schichtwiderstände sind mittels induktivem Inline-System auf texturierten (TXT) und sägeschaden-geätzten (SDE) Oberflächen gemessen, die Dotierprofile mittels ECV auf texturierten Oberflächen bestimmt und auf den induktiv gemessenen Schichtwiderstand skaliert.

Wie in den Dotierprofilen zu sehen, führt eine Erhöhung von T_p zu einer deutlich tieferen Eindiffusion, wohingegen die Oberflächenkonzentration nahezu unbeeinflusst bleibt. Es gelangt bei höherer Temperatur insgesamt also mehr Dotierstoff in den Wafer und der Schichtwiderstand des FFE sinkt.

Um die Menge an Dotierstoff unabhängig von T_p einstellen zu können, wurden daher in einem zweiten Experiment die Gasflüsse während der Belegung (Aufbringen der PSG-Schicht) variiert. Damit konnte die Oberflächenkonzentration und auch die Dotier-Dosis insgesamt abgesenkt und der Schichtwiderstand erhöht werden. Dies ermöglichte die Realisierung von hohen Schichtwiderständen im Bereich 1000 Ω/sq . auch bei Plateau-Temperaturen von $T_p = 900^{\circ}\text{C}$ und darüber.

Eine wichtige Frage für die industrielle Umsetzung ist, inwieweit die im Projekt entwickelten Rezepte auch für industrielle Bedingungen geeignet sind. Dies betrifft insbesondere die Homogenität des Schichtwiderstandes über das Prozessboot bei vollständiger Beladung des Bootes mit „frischen“ Wafern, welche noch keine PSG-Schicht aufweisen. Um dies zu überprüfen, wurde ein Experiment durchgeführt und das im IBC 1 Zellprozess verwendete Rezept einmal mit 200 frischen und 300 „Dummie“-Wafer mit bereits vorhandener PSG-Schicht gefahren, und in einem weiteren Run das Boot vollständig mit 500 frischen Wafern beladen (in beiden Fällen ein Wafer je Slot). Das Ergebnis ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Verteilung des Schichtwiderstandes über das Prozessboot ist für die beiden Varianten sehr ähnlich. Insbesondere ist keine Erhöhung des Schichtwiderstands bei voller Beladung mit frischen Wafern erkennbar, für texturierte Proben sinkt der Schichtwiderstand sogar eher. Dies demonstriert die Eignung der entwickelten Prozesse für die industrielle Umsetzung.

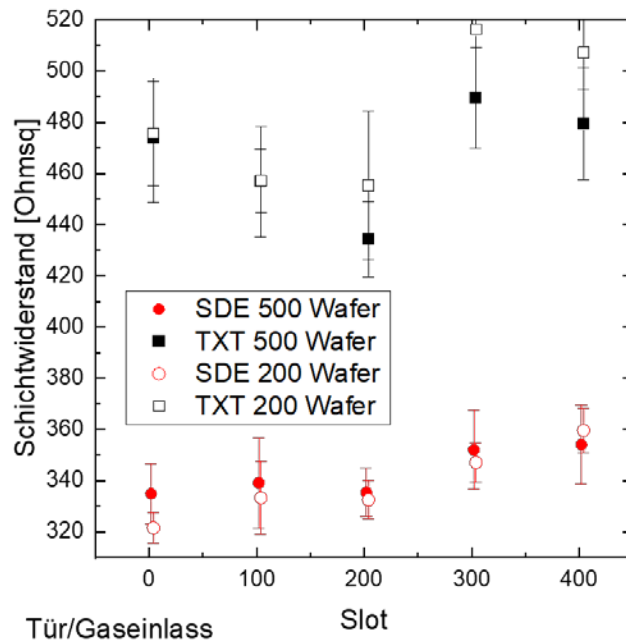


Abbildung 3: Schichtwiderstand gemessen mittels induktivem Inline-System auf texturierten (TXT) und sägeschaden-geätzten (SDE) Oberflächen über fünf Position der Proben im Prozessboot. Es wurden einmal 200 frische Wafer und 300 Dummy-Wafer mit bereits vorhandener PSG-Schicht verwendet (leere Symbole), und einmal das Boot vollständig mit 500 frischen Wafern beladen (volle Symbole), in beiden Fällen mit einem Wafer je Slot im Prozessboot.

Abbildung 4 zeigt die gemessenen impliziten Spannungen von iVoc-Strukturen, bei denen die Plateau-Temperatur des POCl_3 -Prozesses variiert wurde. Es wurden mit den Teststrukturen implizite Spannungen im Bereich von 725 mV erreicht. Der beobachtete Trend bzgl. der Plateau-Temperatur ist nicht durchgängig, ein Absinken von iVoc bei Plateau-Temperaturen oberhalb von 900°C ist aber aufgrund von stärkerer Eindiffusion von Phosphor aus der TOPCon-Schicht zu erwarten.

Ein Vergleich der offenen und vollen Symbole in Abbildung 16 zeigt den Einfluss der Beleuchtung vor der QSSPC-Messung. Werden die Proben zuvor beleuchtet, steigt die Spannung deutlich an. Dieser Effekt wurde bereits bei im Projekt hergestellten Solarzellen beobachtet (siehe unten).

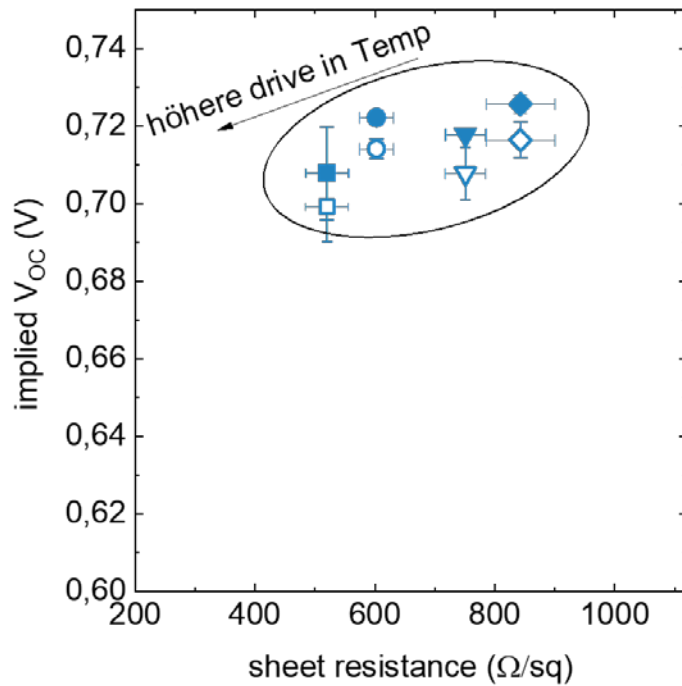


Abbildung 4: implizierte Spannung iV_{oc} gemessen mittels quasistatischer Photoleitfähigkeitsmessung (QSSPC) an Teststrukturen aus Ga-dotierten Wafern ($0,6 \Omega\text{cm}$) mit vorderseitigem FFE und rückseitigem TOPCon-Schichtsystem, gemessen nach Kontaktfeuern und Dunkellagerung (offene Symbole) bzw. nach nachfolgender Beleuchtung äquivalent zu einer Sonne über ca 1 Minute (volle Symbole). Es werden jeweils 5 Messungen pro Wafer bei 1 bis 2 Proben je Prozessgruppe dargestellt, aufgetragen über den an Referenzproben bestimmten Schichtwiderstand des FFE.

Entwicklung PECVD-Si-Schichtabscheidung

Im Projektverlauf wurde ein Experiment zur Bestimmung der Ladungsträgerrekombination im metallisierten und unmetallisierten (passivierten) Bereich der TOPCon-Schicht der IBC1-Solarzelle durchgeführt. Die relevanten Größen dafür sind die entsprechenden lokalen Sättigungsstromdichten $j_{0,met}$ und $j_{0,pas}$. Hierfür wurden beidseitig TOPCon-beschichtete Proben nach dem IBC1-Prozessfluss hergestellt, was auch die PECVD-Beschichtung auf beiden Seiten beinhaltet. Ein Teil dieser Wafer wurde nach der PECVD Beschichtung einseitig mit Finger-Strukturen in einem Testfeld-Layout mittels Siebdrucks von Ag-Paste und Kontaktfeuern metallisiert. Ein weiterer Teil der Proben wurde vollständig ohne Metallisierung gefeuert. Die Bestimmung von $j_{0,pas}$ erfolgte über QSSPC-Messungen an den unmetallisierten Proben. Die zusätzliche Auswertung beider Probenarten mittels Photolumineszenz (PL), wie in Abbildung 5 gezeigt, ermöglicht die Bestimmung von $j_{0,met}$. Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise liefert Ref. [26]. In das Experiment wurden folgende Variationen implementiert:

- Cz-Si Wafer Material (p-Typ 0,6 Ω cm und n-Typ 6 Ω cm)
- Morphologie Rückseite (Textur vs. saure Kantenisolation/CKI)
- Dotierung und Dicke der Poly-Si-Schicht
- Plateau-Temperatur des $POCl_3$ -Prozesses

Dabei wurde die Prozesszeit der Si-Schichtabscheidung auf die Morphologie der Oberfläche angepasst, um auf den unterschiedlichen Oberflächen annähernd gleiche Schichtdicken zu erzielen.

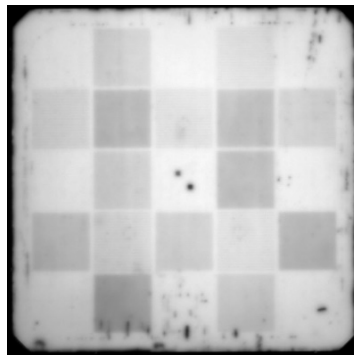


Abbildung 5: Photolumineszenz-Aufnahme einer mit unterschiedlichen Testfeldern teilweise metallisierten Probe. Die erhöhte Ladungsträgerrekombination in den metallisierten Testfeldern führt zu erhöhter Rekombination und daher geringerem PL-Signal. Die genaue Vorgehensweise zur Bestimmung von $j_{0,met}$ ist in Ref. [26] beschrieben.

Es wurden für einige Prozessgruppen niedrige Sättigungsstromdichten $j_{0,pas}$ der TOPCon-Schicht im Bereich von 4 bis 5 fA/cm^2 gemessen, für Emitter-Strukturen auf p-Typ Substrat lagen die Werte im Bereich $j_{0,pas} \approx 7 fA/cm^2$. Für die unmetallisierten Bereiche ($j_{0,pas}$) zeigt der Vergleich der sauren Kantenisolation mit der alkalischen Textur, dass auch texturierte Oberflächen niedrige Rekombinationseigenschaften aufweisen. Ein Effekt der vergrößerten Oberfläche durch die Textur ist bei gleicher Schichtdicke kaum zu erkennen. Die Schichtdicke an sich hat wie erwartet nur einen geringen Einfluss auf $j_{0,pas}$. Eine höhere Dotierung der Si-Schicht erhöht $j_{0,pas}$ deutlich,

ebenso eine Anhebung der Plateau-Temperatur. In beiden Fällen zeigen ECV-Messungen eine Zunahme der Eindiffusion von Phosphor durch die Tunneloxidschicht, was die beobachteten Trends erklären kann.

Für die Sättigungsstromdichten $j_{0,\text{met}}$ im metallisierten Bereich der TOPCon-Schicht wurden die niedrigsten Werte im Bereich 40 bis 50 fA/cm² gemessen. Für Emitter-Strukturen auf p-Typ Substrat lagen die Werte im Bereich $j_{0,\text{met}} \approx 100$ fA/cm². Die Verwendung von p-Typ Wafern als Teststruktur liefert im Vergleich zu n-Typ Wafern bis zu 150% höhere $j_{0,\text{met}}$ -Werte. In diesem Fall kommt eine physikalische Ursache in Frage, da die Metallisierung durch das Kontaktsintern lokal bis zur Tunneloxid-Schicht und in den Si-Wafer hinein vordringen kann. Bei Vorhandensein einer Raumladungszone, wie hier für die p-Typ Proben der Fall, kann dies zu deutlich stärkerer Ladungsträgerrekombination führen [27].

Der Vergleich der sauren Kantenisolation mit der alkalischen Textur zeigt bei gleicher Schichtdicke auch für $j_{0,\text{met}}$ nur einen geringen Effekt. Dickere Schichten führen wie erwartet zu tendenziell geringeren Werten für $j_{0,\text{met}}$, da der Metallkontakt durch die dickere Schicht weniger stark bis zur Grenzfläche vordringen kann.

Entwicklung Gesamtprozess pIBC1

Insgesamt wurden im Projektverlauf 8 Solarzellenruns gemeinsam mit dem ISC Konstanz geplant und durchgeführt. Der Prozessfluss ist in Abbildung 6 dargestellt

Cz-Si:Ga (M2 format, $\rho_B = 1-2 \Omega \cdot \text{cm}$)
Single side texturing / Cleaning
Thermal oxidation
PECVD n-PolySi
Poly-Si annealing / FFE
Laser structuring
Chemical etching / Cleaning
Thermal oxidation
FS PECVD ARC (SiN_x)
RS PECVD passivation ($\text{AlO}_x + \text{SiN}_x$)
Laser contact opening (LCO)
Silver screen printing
Aluminum screen printing
Contact firing
IV measurements

Abbildung 6: Prozessfluss zur Herstellung von p-IBC-Solarzellen nach der IBC1-Sequenz

Details zu den Ergebnissen sind auch dem Abschlussbericht des ISC Konstanz zu entnehmen. Die höchsten erreichten Wirkungsgrade, welche vom Fraunhofer ISE CalLab PV cells bestätigt wurden, lagen bei knapp 23%, die IV Parameter sind Abbildung 7 zusammengestellt.

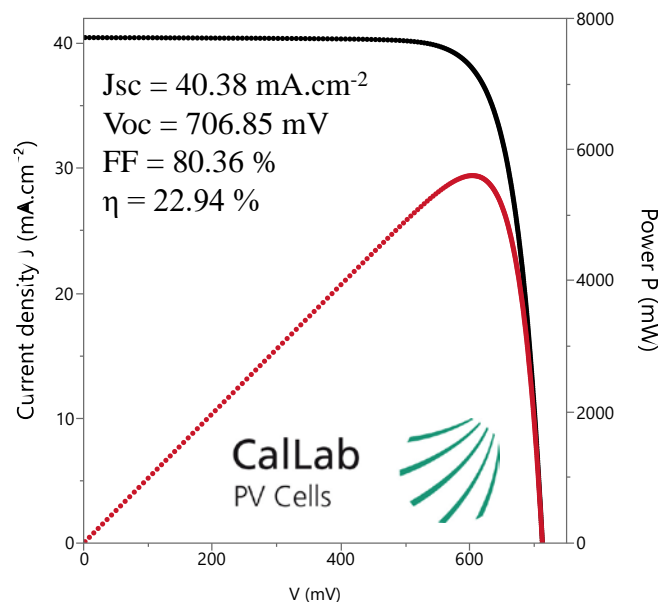


Abbildung 7: IV-Kurve und Parameter einer p-IBC-Solarzelle gemessen am Fraunhofer ISE CalLab PV Cells

4.3 AP 5 Entwicklung HF/HCl/O₃ Reinigung

In Solarzellencharge „IBC Run 4“ wurde eine Variation der nasschemischen Reinigung vor dem POCl₃-Prozess durchgeführt. Dabei wurde in einer Gruppe ein HNO₃-basierter Prozess an einer manuellen Nassbank verwendet und in einer weiteren Gruppe ein O₃-basierter Prozess an einer industriellen Nasschemie-Anlage. Neben den verwendeten Chemikalien unterscheiden sich die Prozesse auch durch die Trocknung am Prozessende. Die HNO₃-Reinigung stellt einen hochwertigen Referenz-Prozess zur industriellen Reinigung dar. Es wurden in gemeinsamer Prozessierung mit dem ISC Konstanz Solarzellen und Teststrukturen in den beiden Gruppen hergestellt. Beide Gruppen erzielten hohe iV_{oc} -Werte über 720 mV bei vergleichbaren Mittelwerten. Auch die PL-Aufnahmen zeigen keinen qualitativen Unterschied. Die IV-Parameter der hergestellten IBC1-Solarzellen zeigen sich sogar ein geringer Vorteil für die industrielle Reinigung. Die industrielle O₃-basierte Reinigung ist also für den IBC1-Prozessfluss sehr gut geeignet.

Ein weiteres Experiment zur Verringerung der KOH-Konzentration in alkalischen Ätzprozessen und der damit verbundenen HCl/Ozon Nachreinigung wurde durchgeführt, um den Chemieverbrauch zu verringern und die Passivierqualität zu verbessern. Bei verschiedenen konzentrierten KOH-Ätzlösungen wurde der Sägeschaden von p-Typ Wafern entfernt und die Oberfläche geglättet. Anschließend wurden die Wafer mit Atomlagenabscheidung (ALD) Al₂O₃ und PECVD SiNx-Schichten passiviert und gefeuert und somit symmetrische Lebensdauerproben hergestellt. Bei gleicher Oberfläche zeigt die implizite Spannung (iV_{oc}), dass bei niedriger KOH-Konzentration unter Verwendung eines Ätz-Additivs die höchste Passivierqualität erreicht wird. Dieser Ansatz wurde anschließend als neuer Standard-Prozess im Labor am Fraunhofer ISE etabliert.

4.4 AP 10 Techno-ökonomische Analysen

Es wurde im Projektverlauf eine Analyse der Wirtschaftlichkeit der IBC1-Sequenz basierend auf dem am ISE etablierten Kostenmodell SCost durchgeführt [28]. Dabei wurden sowohl die PERC- als auch die TOPCon-Sequenz als Referenz-Szenarien verwendet. Grundlage der Berechnung sind am Fraunhofer ISE in den Kostenmodellen vorliegende Daten der Referenzprozesse sowie Informationen, die vom Projektpartner ISC bereitgestellt wurden, hier gab es einen intensiven Austausch. Es wurde ein um 0,7%_{abs} höherer Wirkungsgrad der IBC1-Solarzellen gegenüber der PERC-Referenz angenommen. Das Ergebnis der Abschätzung der zu erwartenden Modulkosten und Stromgestehungskosten (LCOE) zeigt, dass die spezifischen Modulkosten für PERC und pIBC nahezu gleich sind, für TOPCon noch geringfügig höher. Bei den Stromgestehungskosten zeigt sich, dass für monofaziale Anwendungen die IBC1-Sequenz einen geringen Vorteil sowohl gegenüber PERC als auch gegenüber TOPCon besitzt. Eine Sensitivitäts-Analyse zeigt, dass ein Wirkungsgradvorteil der IBC1-Zellstruktur von 0,45%_{abs} ausreicht, um auf Ebene der Stromgestehungskosten (bifazial) gleichwertig mit der PERC-Referenztechnologie zu sein.

5 Veröffentlichungen

Mit den Ergebnissen des Projektes wurden folgende Beiträge auf Konferenzen erbracht

- L. Koduvelikulathu et al. "Industrial Feasible Screen Printed IBC Solar Cell Based on PECVD a-Si (N) Deposition on Large Area p-Type Substrates", WCPEC-8 (39th EUPVSEC), September 26th to 30th 2022, Milan, Italy
- L. Rachdi et al. "Development and Process Optimization of a p-IBC Solar Cell with PECVD Deposited Passivated Contacts", 40th EUPVSEC, September 18th to 22nd 2023, Lisbon, Portugal

In beiden Fällen wurden die Ergebnisse durch den Projektpartner ISC Konstanz präsentiert, enthalten aber auch substantielle Beiträge des Fraunhofer ISE.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Y. H. Kwark and R. M. Swanson, "N-type SIPOS and poly-silicon emitters," *Solid State Electron*, vol. 30, no. 11, pp. 1121–1125, 1987, doi: 10.1016/0038-1101(87)90076-1.
- [2] J. Y. W. Seto, "The electrical properties of polycrystalline silicon films," *J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 12, p. 5247, 1975, doi: 10.1063/1.321593.
- [3] A. Richter, J. Benick, F. Feldmann, A. Fell, M. Hermle, and S. W. Glunz, "n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 173, pp. 96–105, 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.05.042.
- [4] Y. Chen et al., "Mass production of industrial tunnel oxide passivated contacts (i-TOPCon) silicon solar cells with average efficiency over 23% and modules over 345 W," *Prog Photovolt Res Appl*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1002/pip.3180.
- [5] F. Feldmann, M. Bivour, C. Reichel, M. Hermle, and S. W. Glunz, "Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, pp. 270–274, 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2013.09.017.
- [6] A. Merkle et al., "Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition of In-Situ Doped Amorphous Silicon Layers for Passivating Contacts," 2018, doi: 10.4229/35THEUPVSEC20182018-2DV.3.49.
- [7] Di Yan, A. Cuevas, S. P. Phang, Y. Wan, and D. Macdonald, "23% efficient p-type crystalline silicon solar cells with hole-selective passivating contacts based on physical vapor deposition of doped silicon films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 113, no. 6, p. 61603, 2018, doi: 10.1063/1.5037610.
- [8] J. Stuckelberger et al., "Passivating electron contact based on highly crystalline nanostructured silicon oxide layers for silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 158, pp. 2–10, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.06.040.

- [9] R. Peibst *et al.*, "Implementation of n+ and p+ Poly Junctions on Front and Rear Side of Double-Side Contacted Industrial Silicon Solar Cells," *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 323–327, 2016, doi: 10.4229/EUPVSEC20162016-2BO.3.2.
- [10] G. Nogay *et al.*, "Crystalline Silicon Solar Cells With Coannealed Electron- and Hole-Selective SiC_x Passivating Contacts," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1478–1485, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2866189.
- [11] B. Steinhauser, J.-I. Polzin, F. Feldmann, M. Hermle, and S. W. Glunz, "Excellent Surface Passivation Quality on Crystalline Silicon Using Industrial-Scale Direct-Plasma TOPCon Deposition Technology," *Sol. RRL*, vol. 2, no. 7, p. 1800068, 2018, doi: 10.1002/solr.201800068.
- [12] N. Nandakumar *et al.*, "Approaching 23% with large-area monoPoly cells using screen-printed and fired rear passivating contacts fabricated by inline PECVD," *Prog Photovolt Res Appl*, vol. 15, no. 1, p. 41, 2018, doi: 10.1002/pip.3097.
- [13] F. Feldmann *et al.*, "Industrial TOPCon Solar Cells Realized by a PECVD Tube Process," in *EUPVSEC 2020*.
- [14] T. N. Truong *et al.*, "Hydrogen-Assisted Defect Engineering of Doped Poly-Si Films for Passivating Contact Solar Cells," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 2, no. 12, pp. 8783–8791, 2019, doi: 10.1021/acsaem.9b01771.
- [15] M. Schnabel *et al.*, "Hydrogen passivation of poly-Si/SiO_x contacts for Si solar cells using Al₂O₃ studied with deuterium," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 112, no. 20, p. 203901, 2018, doi: 10.1063/1.5031118.
- [16] M. K. Stodolny *et al.*, "Novel Schemes of p+ poly-Si Hydrogenation Implemented in Industrial 6" Bifacial Front-and-Rear Passivating Contacts Solar Cells," 2018, doi: 10.4229/35thEUPVSEC20182018-2CO.10.3.
- [17] B. Kafle, B. Goraya, S. Mack, F. Feldmann, S. Nold, and J. Rentsch, "TOPCon – Technology Options for Cost Efficient Industrial Manufacturing," in *EUPVSEC 2020*.
- [18] M. Muehlbauer, A. Piechulla, C. Voyer, M. Citro, R. Dahl, and P. Fath, "Industrial Low-Pressure Phosphorus Diffusion for High Performance and Excellent Uniformity," in *26th EUPVSEC Hamburg: 2011*, Hamburg, Germany, 2011, pp. 2028–2030.
- [19] A. Kimmerle *et al.*, "Precise parameterization of the recombination velocity at passivated phosphorus doped surfaces," *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 2, p. 25706, 2016, doi: 10.1063/1.4939960.
- [20] A. Bentzen and A. Holt, "Overview of phosphorus diffusion and gettering in multicrystalline silicon," *Mat Sci Eng B-Solid*, 159-160, pp. 228–234, 2009, doi: 10.1016/j.mseb.2008.10.060.
- [21] J. Haunschild, J. Broisch, I. Reis, and S. Rein, "Cz-Si wafers in solar cell production: Efficiency-limiting defects and material quality control," *Photovoltaics International*, no. 15, pp. 40–46, 2012.
- [22] P. Saint-Cast *et al.*, "High-temperature stability of c-Si surface passivation by thick PECVD Al₂O₃ with and without hydrogenated capping layers," *Applied Surface Science*, vol. 258, no. 21, pp. 8371–8376, 2012, doi: 10.1016/j.apusc.2012.03.171.

- [23] Aiko solar, "Overcoming technical constraints of PERC leading to ABC cells to reach single junction Si cell efficiency limits," *11th workshop on back contact solar cell and module technology*, 2023. [Online]. Available: <https://www.backcontact-workshop.com/>
- [24] Tongwei solar, "p-type TBC cell and module pilot running in Tongwei," *11th workshop on back contact solar cell and module technology*, 2023. [Online]. Available: <https://www.backcontact-workshop.com/>
- [25] J. Horzel *et al.*, "High Lifetime Ga-Doped Cz-Si for Carrier-Selective Junction Solar Cells," *Sol. RRL*, p. 2200613, 2022, doi: 10.1002/solr.202200613.
- [26] D. Herrmann *et al.*, "Spatially Resolved Determination of Metallization-Induced Recombination Losses Using Photoluminescence Imaging," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 11, no. 1, pp. 174–184, 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3038336.
- [27] N. Wöhrle, E. Lohmüller, J. Greulich, S. Werner, and S. Mack, "Towards understanding the characteristics of Ag–Al spiking on boron-doped silicon for solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 146, pp. 72–79, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.11.032.
- [28] S. Nold, *Techno-ökonomische Bewertung neuer Produktionstechnologien entlang der Photovoltaik-Wertschöpfungskette: Modell zur Analyse der Total Cost of Ownership von Photovoltaik-Technologien*. Dissertation: Fraunhofer Verlag, 2019. [Online]. Available: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-574724.html>