

Abschlussbericht TOPCon Cluster

Öffentlicher und nicht-öffentlicher Teil

Verbundnamen:

Technologiecluster für die industrielle Fertigung von Solarzellen mit Tunneloxid-passivierenden Kontakten

Teilvorhaben:

Direkt-Plasma Abscheidung von TOPCon-Schichten

Schlagworte zum Verbund (max. 10):

PECVD, PECVD von a-Si Schichten, TOPCon-Schichten, TOPCon Solarzellen

gefördert vom



Förderkennzeichen 03EE1065E

Verbundpartner

Firma/Institution	Ansprechpartner	Adresse
Fraunhofer ISE	Andreas Wolf	Heidenhofstr.2 79110 Freiburg
SINGULUS Technologies AG	Thorsten Dippell	Hanauer Landstrasse 103, 63796 Kahl am Main
RENA Technologies GmbH	Christian Schmitt	Höhenweg 1 78148 Gütenbach
Gebr. SCHMID GmbH	Sven Seren	Robert-Bosch-Str. 32-36 72250 Freudenstadt
RCT Solutions GmbH	Wolfgang Jooss	Line-Eid-Str. 1 78467 Konstanz
centrotherm international AG	Thomas Pernau	Württembergischer Str. 31 89143 Blaubeuren
Heraeus Noblelight GmbH	Jürgen Weber	Reinhard-Heraeus-Ring 7 63801 Kleinostheim
Energetica Industries GmbH	René Battistutti	Energieplatz 1 A-9556 Liebenfels Österreich
InnoLas Solutions GmbH	Martin Graf	Pionierstraße 6 82152 Krailling
Namics Europe GmbH	Sedat Yagci	Max-Emanuel-Platz 1, 85764 Oberschleißheim
VDMA Photovoltaik-Produktionsmittel	Jutta Trube	Lyoner Str. 18 60528 Frankfurt/Main

Inhalt

Abschlussbericht TOPCon Cluster	1
1. Kurzbericht	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen des Vorhabens	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.3.1 Arbeitspakete	6
1.3.2 Meilensteine	9
1.3.3 Arbeitsinhalte (chronologisch)	10
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	12
1.4.1 Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Gesamtprojekt)	12
1.4.2 Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Teilvorhaben)	13
1.4.3 Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes	15
1.4.4 Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)	15
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
2. Ausführlicher Bericht	17
2.1 Leistung und Ergebnisse in Arbeitspaketen	17
2.1.1 Arbeitspaket 1 Bor-Emitter-Ausbildung und -Passivierung	17
2.1.2 Arbeitspaket 2 Tunneloxid und Nasschemische Reinigung	19
2.1.3 Arbeitspaket 3 Schichtabscheidung und Anneal	25
2.1.4 Arbeitspaket 4 Einseitige Ätzprozesse	42
2.1.5 Arbeitspaket 5 Siebdruckmetallisierung	42
2.1.6 Arbeitspaket 6 Galvanik-Metallisierung	42
2.1.7 Arbeitspaket 7 Basisprozess	43
2.1.8 Arbeitspaket 8 Kostenkalkulation	44
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	45
2.2.1 Material und Verbrauchsmittel	45
2.2.2 F&E Fremdleistungen, sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	45
2.2.3 Vorhabenbezogene Stunden	45
2.2.4 Reisekosten	45
2.2.5 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	45
2.2.6 Investitionskosten und Abschreibungen	45

2.3	Notwendigkeit der Zuwendung	46	
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	46	
2.5	F&E Erkenntnisse von dritter Seite, die für das Vorhaben relevant sind	47	47
2.6	Liste der Veröffentlichungen	47	
3.	Auszug-Zusammenfassung des nicht-öffentlicher Teils	48	
3.1	Beitrag des Ergebnisses zu den Förderpolitischen Zielen	48	
3.1.1	Zweck der Zuwendung	48	
3.1.2	Gegenstand der Förderung	48	
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens	49	
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	49	
3.3.1	Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen	49	
3.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	49	
3.3.3	Technisch-wissenschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	49	49
3.3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	49	
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	49	
3.5	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	49	
3.5.1	Kostenplan	49	
3.5.2	Zeitplan (Meilensteine)	50	
3.5.3	Zeitplan (Projektstunden)	50	

1. Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Im Projekt TOPCon Cluster schlossen sich führende Anlagenhersteller aus Deutschland und das Fraunhofer ISE zusammen, um die Technologie-Basis für die industrielle Umsetzung von Solarzellen mit Tunneloxid-passivierenden Kontakten (Tunnel Oxide Passivating Contact, TOPCon) bereitzustellen. Ziel war es, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Anlagenbauer zu stärken, so dass diese am erwarteten starken Aufbau von auf TOPCon basierenden Produktionskapazitäten partizipieren können.

In diesem Teilvorhaben sollten TOPCon-Schichten basierend auf Direkt-Plasma PECVD von amorphen Si-Schichten erstellt werden. Die Technologie dazu war bereits bekannt (siehe nächsten Abschnitt). Hauptaufgabe war, die Schichtentwicklung auf optimierten, vergrößerten Waferträgern weiter zu entwickeln, wobei die Waferträger so ausgeführt werden sollten, dass die beschichteten Zellen bei Rückwärtsbelastung einen sehr geringen Leckstrom aufweisen. Dieser Leckstrom wurde in einem eigenen Meilenstein (MS 3.4) festgelegt. Außerdem musste die von centrotherm bereitgestellte Schicht Meilensteile der Projektpartner erfüllen. Es war zu erwarten, dass für die Herstellung von leitfähigen Schichten im Sinne des Projekts die Waferträger in Form und Funktion weiterentwickelt werden müssen, und zunehmend von der bisher etablierten Formgebung für nichtleitfähige Schichten abweichen werden. Es war insbesondere zu erwarten, dass einige Komponenten der Waferträger speziell auf die Anwendung mit leitfähigen Schichten optimiert werden müssen.

Als Hersteller von Feueröfen wollte centrotherm ebenfalls die Entwicklung der Kontaktfeuerprozesse beobachten und auf eigenen Gerätschaften Referenzprozesse im Sinne des Projektes durchführen.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Die Machbarkeit von TOPCon-Schichten im Sinne des Vorhabens war bereits im Förderprojekt Upgrade Si-PV, FKZ 0325877X mit einer Laboranlage beim Projektpartner Fraunhofer ISE nachgewiesen. Ebenso war der Nachweis erbracht, dass sich der Abscheideprozess in der Laboranlage auf größere Waferträger skalieren lässt (nur beschränkt durch die Größe der Laboranlage). Im zum Zeitpunkt des Projektstarts noch laufenden Projekt Genesis, FKZ 0324274X lief die Skalierung auf zum Start des Projekts industrieübliche Waferträger in industriellen Standardanlagen. Diese Standardanlagen erreichten einen großen Durchsatz, indem Waferträger mit einer großen Anzahl von Wafern (typischerweise > 300 pro Träger) langsam aber gleichmäßig beschichtet werden. Der Waferträger war als Plattenstapel ausgeführt und in seiner Grundform ein länglicher Quader. Die Plasmaentladung zur Schichterzeugung im Sinne des Projekts fand zwischen entgegengesetzt gepolten Platten des Plattenstapels statt. Die äußeren Platten begrenzen die Plasmaentladung, insbesondere kann keine schichtbildende Plasmaentladung außerhalb des vorgegebenen Volumens stattfinden. Die Beschichtung der behandelten Wafer war dabei inhärent einseitig und deutlich bevorzugt auf der Waferseite, die dem Plasma ausgesetzt ist. Der Waferträger konnte absehbar weiter vergrößert werden, solange er gleichmäßig von Prozessgas durchströmt wird und mit einer

konstanten Leistung/Fläche versorgt wird. Dabei wurde eine verbesserte Effizienz des Systems erwartet. Es wurde vermutet, dass die denkbar beste Beschichtungsqualität mit einem unendlich großen Waferträger erreicht werden könnte, und nur die technisch notwendigen Grenzen der Prozesskammer eine Rolle spielen. Es war bereits bekannt, dass die Isolatoren zwischen den Platten des Plattenstapels ungewollt beschichtet werden und ausfallen können.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1 Arbeitspakete

AP 0 Projektkoordination

In diesem AP erfolgte die Koordination der Projektarbeit. centrotherm musste Zuarbeiten für den Projektkoordinator Fraunhofer ISE liefern.

AP 1 Bor-Emitter-Ausbildung und -Passivierung

Ziel dieses AP war es, die Vorderseite der Solarzelle unter industriellen Rahmenbedingungen weiter zu entwickeln, da diese Seite die Rekombinationsverluste dominiert. Der Gesamt-Sättigungsstrom der Vorderseite sollte auf unter 40 fA/cm^2 gesenkt werden (inkl. Metallisierung). Dazu sollten die Prozesse Textur, BBr_3 -Diffusion, Reinigung und Passivierung optimiert und auch die Metallisierung (AP5) angepasst werden. Die Arbeiten wurden größtenteils am Fraunhofer ISE durchgeführt, centrotherm hat Zuarbeiten unter Verwendung von Laboranlagen am Standort Blaubeuren geliefert.

AP 2 Tunneloxid und nasschemische Reinigung

Beim Partner RENA sollten in diesem Arbeitspaket Untersuchungen der Textur und Reinigung für TOPCon Zellen erfolgen. Die notwendige Adaptionen des Verfahrens und die Analyse der Notwendigkeit von nasschemischen Reinigungen zu unterschiedlichen Prozessstadien sollen in diesem Arbeitspaket evaluiert werden. Hierzu werden bei RENA Wafer hergestellt, welche am Fraunhofer ISE weiter prozessiert werden.

Beim Partner SCHMID sollten in diesem Arbeitspaket untersucht werden, inwieweit für nasschemische Tunneloxide die Ozonkonzentration im Bad der Inline-Anlage erhöht werden kann. Dies hätte kürzere Prozesszeiten und damit einen höheren Durchsatz zur Folge. Weiterhin soll untersucht werden, inwieweit das so gewachsene Oxid mit den Abscheideparametern der nachfolgend mit APCVD abgeschiedenen a-Si Schicht interagiert.

Am Fraunhofer ISE wurden Referenzprozesse, z.B. thermisches Oxid und hochwertige Reinigungsprozesse bereitgestellt für Benchmarking sowie die Prozessintegration in AP 7. Auch sollten Proben der Partner dieses APs am ISE charakterisiert werden.

Im Laufe des Projektes hat sich herausgestellt, dass geeignete Tunneloxide auch im PECVD-Verfahren hergestellt werden können. centrotherm hat sich an den Vorgaben für nasse und APCVD Oxide orientiert und analog dazu PECVD Oxide geliefert

AP 3 TOPCon Schichtabscheidung und Anneal

In diesem Arbeitspaket entwickelte und bewertete SINGULUS neuartige Plasmaverfahren zur Abscheidung von a-Si bzw. poly-Si Schichten für passivierende Kontakte mittels PECVD (Hochfrequenz remote Plasma). Hierbei sollte an einem Teststand die Abscheidung von undotierten und dotierten a-Si Schichten bewertet und optimiert werden. Die zu entwickelnden Verfahren zur Herstellung von TOPCon-Solarzellen wurden hinsichtlich Industrietauglichkeit bzw. Hochskalierbarkeit beurteilt. Im Fokus standen dabei sowohl PECVD Prozesse für die Abscheidung der dotierten poly-Si Schicht als auch die Temperprozesse für die Ausheilung dieser Schichten, damit eine hohe Passivierqualität erreicht werden kann. Alternative Prozessführungen und Abscheideverfahren wie z.B. ex-situ anstelle von in-situ Dotierung sollten ebenfalls im Projekt betrachtet werden. Im Rahmen des Projektes sollte ein bereits bestehender Teststand für die neuen Anforderungen umgebaut und erprobt werden. Die Prozessentwicklungen sollten sowohl bei SINGULUS in Kahl als auch am Fraunhofer ISE in Freiburg stattfinden.

Bei centrotherm sollten industrielle PECVD Prozesse (Niederfrequenz Direktplasma) zur Abscheidung von dotierten Si-Schichten für TOPCon Anwendungen entwickelt werden. Es wurde dabei auf die bestehende und im Feld bewährte Rohrofen-Technologieplattform aufgebaut. Im Fokus stand dabei die streng einseitige Abscheidung der Schicht, welche keine Nachbehandlung der Kanten erfordert und dennoch die nötigen Voraussetzungen an die Stabilität der Solarzelle unter Beaufschlagung mit negativen Spannungen erfüllt. Die Prozessentwicklungen sollten sowohl bei centrotherm als auch am Fraunhofer ISE stattfinden.

Beim Partner SCHMID sollte in diesem AP die dort entwickelte APCVD a-Si bzw. poly-Si Schicht für passivierende Kontakte weiter optimiert werden. Mit einem neu entwickelten a-Si Injektor, der Mitte 2019 installiert wurde, stand bei SCHMID eine Vielzahl an Freiheitsgraden bei der a-Si Abscheidung zur Verfügung, mit denen die gewünschten Schichteigenschaften in diesem Arbeitspaket gefunden werden sollten. Als wichtigste Parameter der Abscheidung wurden hierbei Temperatur (Präkursor-Gase, Injektor-Kopf, Abscheidekammer, post-deposition Zone), Gürtel-Geschwindigkeit, Gasflüsse, Gasverdünnungen (N₂) sowie der Abstand zwischen Injektor und Wafer anvisiert. Ein weiterer wichtiger Gegenstand der Untersuchungen in diesem Arbeitspaket war die Optimierung der Homogenität der Abscheidung sowie der elektrischen Schichtqualität, insbesondere der Dotierkonzentration. Die Arbeiten bei SCHMID wurden durch Charakterisierung und Referenzprozesse am ISE unterstützt.

Am Fraunhofer ISE wurden die technologischen Ansätze der LPCVD-Abscheidung sowie der dort entwickelten Rohr-PECVD-Abscheidung verfolgt und als Referenzprozesse bereitgestellt. Auch neue Ansätze für den TOPCon Anneal-Prozess (z.B. Kombination Anneal und Emitter-Diffusion) sollten getestet werden.

AP 4 Einseitige Ätzprozesse

Für die TOPCon Zellen wurde der Bor-Emitter optimiert (siehe AP1). Beim Projektpartner RENA sollten Untersuchungen auf der einseitigen Entfernung des optimierten Bor-Emitters erfolgen, sowie die notwendige Nachbehandlung. Die notwendigen Adaptionen des einseitigen Ätzverfahrens sollten in diesem Arbeitspaket evaluiert werden. Beim Projektpartner RENA sollten zusätzlich Untersuchungen zur Entfernung der Umgriffe von TOPCon Schichten erfolgen. Der einseitige Prozess

wurde für verschiedenen poly-Si Abscheidungsverfahren (LPCVD, PECVD) und in unterschiedlichen Prozessstadien (vor/nach Anneal) evaluiert.

Beim Partner SCHMID sollten Untersuchung von einseitigen Ätzprozessen zur Entfernung von Umgriff aus der Si-Abscheidung aus der APCVD-Abscheidung erfolgen.

Am Fraunhofer ISE sollte ebenfalls ein Prozess zur einseitigen Entfernung der Umgriffs der TOP-Con-Schicht etabliert werden, um die komplette Prozesssequenz der Frontend-Prozessierung im PVTEC-Labor abbilden zu können. Das Fraunhofer ISE unterstützte darüber hinaus die Arbeiten von RENA in diesem AP im Rahmen eines Unterauftrags.

AP 5 Siebdruck-Metallisierung und Kontaktfeuern

Inhalt dieses APs war die Metallisierung der bifazialen TOPCon Solarzelle. Der Schwerpunkt der Untersuchungen, welche am Fraunhofer ISE durchgeführt werden, lag dabei auf der beidseitigen Siebdruck-Metallisierung. In Kooperation mit den assoziierten Partner Namics Europe sollten die neuesten Generationen von Ag- bzw Ag/Al-Pasten mit dem Ziel einer schädigungsarmen Kontaktierung der TOPCon-Solarzellen auf der Vorder- und Rückseite evaluiert werden. Eine Optimierung des Co-Feuerprozess stand dabei im Vordergrund. Hierzu sollten Arbeiten mit centrotherm und dem assoziierten Projektpartner Heraeus Noblelight durchgeführt werden, um den Co-Feuerprozess weiterzuentwickeln. Dabei wurden innovative, energieeffiziente Infrarot-Strahler von Heraeus Noblelight (z.B. black.infrared) in einem Feuerofen am Fraunhofer ISE integriert und evaluiert.

Des Weiteren zielten die Arbeiten darauf, möglichst feine Kontakte mit minimaler Abschattung und ausreichender Leitfähigkeit zu realisieren. Hierzu wurden die am Fraunhofer ISE entwickelten Feinliniensiebdruckprozesse auf die hier verwendeten Pasten angepasst. Untersuchungen außerhalb des Projektkonsortiums hatten gezeigt, dass eine Kontaktierung, bei dem die Kontaktfinger nicht elektrisch miteinander verbunden sind (keine Busbars), zu deutlich verbesserten Kontakteigenschaften führt¹. Daher sollen in diesem AP unterschiedliche Siebdruck-basierte Ansätze zur Metallisierung von Vorder- und Rückseite untersucht werden, welche diesen Vorteil nutzen. Die Entwicklungen erfolgten in enger Abstimmung mit den Arbeiten zum Basisprozess und der Modulintegration aus AP 7.

AP 6 Galvanik-Metallisierung

In diesem AP analysierten RENA und ISE die Wechselwirkung von unterschiedlichen TOPCon-Schichten mit der Galvanik-Metallisierung. Die verschiedenen Abscheidungsverfahren und Schichteigenschaften der TOPCon-Schicht sollten hinsichtlich ihrer Interaktion mit den nachfolgenden Laserstrukturierungs- und galvanischen Metallisierungsprozessen untersucht werden. Am Ende sollte ein Schichtsystem identifiziert sein, welches ein geringes Maß an Schädigung und einen geringen Kontaktwiderstand ermöglicht. Die Arbeiten werden durch InnoLas als assoziierten Partner unterstützt, welcher geeignete Laserquellen und angepasste Laser-Prozesse für die Laserablation auf Vorder- und Rückseite einbrachte.

Das Fraunhofer ISE unterstützte die Arbeiten von RENA in diesem AP auch im Rahmen eines Unterauftrags zum Bau von Demonstratormodulen.

¹ H. Chu *et al.*, "Impact of the Presence of Busbars During the Fast Firing Process on Contact Resistances," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 4, pp. 923–929, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2828824.

Die in AP5 bereits erwähnten Infrarot-Strahlquellen sollten in diesem AP für die Anwendung „Temper-Prozessen von Galvanik-Kontakten“ getestet werden. Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung durch die Projektpartner ISE, centrotherm, Heraeus Noblelight und RENA durchgeführt

AP 7 Basisprozess

Am Fraunhofer ISE sollte als Referenz ein Basisprozess zur Herstellung von industriellen TOPCon-Solarzellen auf M2-Format mit mittleren Wirkungsgraden von über 23,5% und Spitzenwirkungsgraden bis 24% aufgebaut, optimiert und über die Projektdauer aufrechterhalten werden. Hier wurden die Entwicklungen der Partner aus AP1 bis AP6 zusammengeführt. Über Hybrid-Prozessierung von Solarzellen bot dieser Basisprozess absehbar die Möglichkeit, die bei den Anlagenherstellern entwickelten Einzelkomponenten zu integrieren und anhand kompletter Solarzellen zu validieren.

Die hergestellten Solarzellen sollten auch bezüglich der Modulintegration überprüft werden. Dies beinhaltet z.B. Haftungstests der Metallisierung und die Untersuchung der Stabilität der Solarzellen unter Beaufschlagung negativer Spannung. Es sollten Muster-Module hergestellt und gängigen Beständigkeitstests unterzogen werden. Der assoziierte Partner Energetica sollte zudem beim Aufbau eines Gesamtprozesses durch Hybridprozessierung unterstützen. Zudem sollten von Energetica großformatige Module aus vom ISE bereitgestellten TOPCon Solarzellen hergestellt werden.

AP 8 Techno-ökonomische und -ökologische Analysen

In diesem AP wurden die Einzelprozesse sowie ganze Solarzellenprozesse ökonomisch bewertet und daraus Anhaltspunkte für die Ausrichtung der Entwicklungen mit dem Ziel der Kostensenkung abgeleitet. Die Partner führten eigene techno-ökonomische Bewertungen zur Bewertung der Technologiebausteine durch. Am Fraunhofer ISE wurden darüber hinaus Solarzellenprozesse mit Hilfe des Tools SCost bewertet. Dieses AP ermöglichte auch den Austausch von relevanten Parametern unter den Partnern und den Vergleich verschiedener Kostenberechnungen.

Mit dem Partner RCT Solutions sollten in einem größeren Rahmen die wichtigsten Referenztechnologien PERC- und Heterojunction-Solarzellen (HJT) analysiert und deren Kostenstrukturen und die Unterschiede zur TOPCon-Technologie bewertet werden. Dabei sollten Parameter wie Produktionsstandort (Asien vs. Europa), Transportkosten und eine mögliche CO₂-Bepreisung bzw. Grenzsteuer berücksichtigt werden. Der Partner RCT brachte hierfür Kostenmodelle und Daten zu einzelnen Prozessen und Referenz-Technologien ein. Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) begleitete die Aktivitäten.

1.3.2 Meilensteine

Für centrotherm wurde der Meilenstein MS 3.4 festgelegt. Außerdem musste die von centrotherm bereitgestellte Schicht festgelegte Meilensteine der Projektpartner (MS 1.1, 2.1, 3.2, 7.1, 7.4, 8.4) erfüllen.

1.3.3 Arbeitsinhalte (chronologisch)

Es werden die Arbeitsinhalte des Teilvorhabens centrotherm aus der Sicht des Industriepartners genannt. Für eine allgemeinere Darstellung siehe Abschnitt 2.1 des Gesamtberichts.

Im Projektmonat 1-6

Es wurde eine erste Untersuchung zu PECVD-Tunneloxiden durchgeführt und darauf basierend eine Anlagenoptimierung gestartet. Auf einer entsprechend modifizierten Anlage sollen PECVD-Oxide mittels Prozessgas Wasserdampf erzeugt werden.

Es wurden lokal begrenzte PECVD-Schichten mittels Glasmasken abgeschieden. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wurden weiterentwickelte Glasmasken beauftragt. Es wurden ebenfalls PECVD-Abscheidungen mit Randmasken durchgeführt, um eine streng einseitige Beschichtung der Wafer ohne Randumgriff zu erzielen. Die Vorgaben bzgl. Randumgriff wurden in Versuchen des Projektpartners Fraunhofer ISE ermittelt.

Es wurden sowohl Vertikal- als auch Horizontalboote zur PECVD-Abscheidung leitfähiger Schichten entwickelt. Für Horizontalboote wurden die notwendigen Eigenschaften für Bootplatten untersucht und die Beschaffung entsprechend weiterentwickelter Platten beauftragt.

Im Projektmonat 7-12

Es wurde eine Versuchsanlage im Hause zur Abscheidung von PECVD-Oxiden ertüchtigt.

Es wurden lokal begrenzte PECVD-Schichten mittels Glasmasken abgeschieden. Dazu wurden nur noch spezielle weiterentwickelte Glasmasken verwendet, weil sie erheblich besser sind als alle anderen getesteten Alternativen. Es wurden 5-10 fach verlängerte Beschichtungsprozesse getestet um das Verhalten der Masken bei Belastung mit großen Schichtdicken zu testen.

Es wurden sowohl Vertikal- als auch Horizontalboote zur PECVD-Abscheidung leitfähiger Schichten getestet. Diese wurden innerhalb von wenigen Stunden mit Schichtdicken äquivalent zu 100 Prozessfahrten belastet, um das Verhalten der Boote bei großen Schichtdicken zu testen. Es wurden zwei kleine Horizontalboote (Versuchsboote) aufgebaut. Aufgrund der Erkenntnisse wurde ein voraussichtlich ideales Versuchsboot entwickelt.

Im Projektmonat 13-18

Für das AP 2 (Tunneloxide) wurde mit einer Prozessentwicklung basierend auf klassischer SiONx Abscheidung gestartet. Diese soll bevorzugt ausgeführt werden, wenn Passivierungsleistung und dünne Schichten erreicht werden können. Bisher konnten minimal 6 nm dünne Schichten erreicht werden, wünschenswert sind nur 2 nm.

Im AP 3 (Schichtabscheidung) wurde die lokale PECVD-Beschichtung mit Hilfe von Glasmasken weiter optimiert. Zur Abscheidung leitender Schichten wurden die erforderlichen Isolatoren weiter optimiert. Es liegt nun ein Konzept vor, wie Isolatoren aufgebaut sein müssen um selbst für hochleitfähige Schichten mit langlebigen Ionen im Plasma beständig zu sein. Schließlich wurde speziell für die Glasmasken die Konstruktion der Bootplatten angepasst um eine bessere Positionierung der Masken zu erlauben.

Im Projektmonat 19-24

Es wurde ein in-Situ Tunneloxid für die PECVD-Abscheidung entwickelt, das in Form eines sehr milden Vorplasmas angewendet werden kann. Es ist voraussichtlich mit einem hochwertigen Annealing-Oxid vergleichbar und kann kontrolliert als nur 1-2 nm dünne Schicht aufgebracht werden.

Es gibt einen weiteren Vorschlag für ein ozonbasiertes Oxid, der ebenfalls getestet werden soll.

Das Problem der parasitären Abscheidung leitender Schichten auf Isolatoren in PECVD-Booten ist mittlerweile gut kontrollierbar. Eine Kombination aus zuverlässigen Isolatoren und ein passender Reinigungsprozess ist mittlerweile etabliert.

Die lokale PECVD-Abscheidung mittels Glasmasken wurde weitergeführt. Sowohl für Vertikal- als auch Horizontalboote gibt es Methoden, um die Abscheidequalität zu verbessern und gleichzeitig die empfindlichen Glasmasken zu schonen. Voraussichtlich können Stapel aus Glasmasken und Wafer automatisiert in ein Graphitboot eingeladen werden. Die maskierte Abscheidung kann hochgenaue Justiermarken erzeugen, an denen sich eine spätere Metallisierung ausrichtet.

Im Projektmonat 25-30

wurden die Arbeiten zur Ausbildung des Bor-Emitters wieder aufgenommen. Es wurde eine Diffusionsanlage im centrotherm-Labor mit dem Dotiergas BCl_3 ausgestattet und in Betrieb genommen. Es wurde eine Entscheidung zum Tunneloxid getroffen: Es soll nur die Vakuum-Prozessvariante mittels eines milden N_2O -Vorplasmas weiterverfolgt werden. Die deutlich teureren Varianten mittels Ozon oder Nasschemie sollen nicht weiterverfolgt werden.

Die Lokale-PECVD-Abscheidung mit Glasmasken wurde weiterentwickelt und bisher bekannte Schwächen der Abscheidung korrigiert. Für die Isolatoren in PECVD-Booten konnte voraussichtlich eine dauerhaft prozessstabile Lösung gefunden werden. Der empfohlene PECVD a-Si Prozess für eine Massenproduktion wurde festgelegt und es wurde der absehbare Verbrauch einer PECVD-Produktionsanlage im Sinne des Projekts ermittelt.

Im Projektmonat 31-36

Mit der im vorigen Projekthalbjahr ertüchtigten BCl_3 -Diffusionsanlage wurde eine Prozessoptimierung für den BCl_3 -Prozess vorgenommen, und dabei deutliche Unterschiede zum etablierten BBr_3 -Prozess festgestellt. Nach der Prozessoptimierung konnten für das Projekt gut nutzbare Schichten erzeugt werden.

Im Arbeitspaket 2 wurde das erforderliche Tunneloxid durch ein mildes PECVD-Vorplasma weiter optimiert. Insbesondere Homogenität und Flexibilität bei verschiedenen Prozessgasen wurden optimiert, so dass der zukünftige Anwender nicht auf Spezialgase angewiesen ist.

Im Arbeitspaket 3 wurden die PECVD-Prozesse und die Graphitboote weiterentwickelt. Aus der Tätigkeit im Arbeitspaket entstand ein Konferenzbeitrag (Vortrag) auf der EUPVSEC.

Die Erfüllung der Aufgaben gemäß ursprünglicher Planung des Projekts war noch nicht vollständig und es wurde beantragt, das Projekt kostenneutral zu verlängern. Der Antrag wurde bewilligt.

Im Projektmonat 37-42

Die noch nicht abgeschlossenen Tätigkeiten wurden zu Ende geführt und es wurde eine industrielle Anlage zur Herstellung von Schichten im Sinne des Projekts konstruiert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

1.4.1 Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Gesamtprojekt)

Die Eigenschaften von passivierenden Kontakten waren bereits aus Halbleiter-Anwendungen bekannt^{2,3}. Am Fraunhofer ISE wurde die Technologie für beidseitig kontaktierte Solarzellen schon vor dem Projektstart weiterentwickelt⁴, so dass kurz vor Projektbeginn auf kleinen Flächen Wirkungsgrade bis 25,8% erreicht wurden. Etwa zeitgleich hatten führende asiatische Zellhersteller Pilot-Produktionen aufgebaut und erreichten damit Wirkungsgrade um 23% auf vollformatigen mit Siebdruck kontaktierten Solarzellen⁵. Mit Hocheffizienz-Ansätzen wurden über 24,5% auf großformatigen Zellen erreicht⁶. Aufgrund der 10. ITRPV roadmap⁷ wurde ein starkes Wachstum des Marktanteils solcher Solarzellen erwartet. Auf dem Markt waren bereits Module mit TOPCon-Solarzellen verfügbar, im Wesentlichen gab es aber nur zwei Zellhersteller, die im industriellen Maßstab produzierten. Die Module wiesen teilweise keine signifikant höheren Leistungen im Vergleich zu Modulen aus PERC Solarzellen auf. Nach Einschätzung des Projektkonsortiums bestand ein großes Problem darin, dass die spezifischen Herstellungskosten der TOPCon-Solarzellen noch erheblich über denen von PERC-Solarzellen lagen und der Wirkungsgradgewinn die erhöhten Aufwände in der Herstellung nicht rechtfertigte. Weiterhin gab es einige bisher ungelöste Fragestellungen im Gesamtprozess und bei der Modulintegration, insbesondere der Stabilität der TOPCon Solarzellen bei Beaufschlagung mit negativer Spannung, wie sie bei teilverschatteten Modulen auftritt. Zum Zeitpunkt des Projektantrags gab es eine Vielzahl von technologischen Optionen für die Umsetzung der TOPCon-Struktur und es war nicht absehbar, welche Technologien sich für die industrielle Fertigung von TOPCon-Solarzellen am besten eignen würden. Als wesentlicher Kostenfaktor wurde auch der erhöhte Silberverbrauch der TOPCon Solarzelle im Vergleich zur PERC Solarzelle identifiziert. Das Projektkonsortium war der Ansicht, dass dringend Entwicklungen notwendig waren, um den Silberbedarf zu reduzieren. Dazu waren Fragestellungen der Zellherstellung und der Modulintegration ungeklärt, ebenso die Entwicklung eines Gesamtprozesses. Für die weitere Marktdurchdringung der TOPCon-Technologie mussten die spezifischen Herstellungskosten weiter gesenkt werden und die Technologiereife erhöht werden.

2 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.

3 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.

4 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.

5 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.

6 TRINA Solar, *Trina Solar meldet neuen Effizienzrekord von 24,58% für monokristalline Silizium i-TOPCon Solarzellen*. [Online]. Available: <https://www.trinasolar.com/de/resources/newsroom/tue-05282019-1224##> (accessed: Feb. 13 2020)

7 ITRPV consortium, "International Technology Roadman for Photovoltaic (ITRPV): Results 2018, 10th edition," 10th Edition, 2019.

1.4.2 Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Teilvorhaben) Direkt-Plasma PECVD

Die technischen Eigenschaften von Direkt-Plasma PECVD sind z.B. in⁸, Kapitel 3 beschrieben. Die dort beschriebene Anlage war Industriestandard von 1998-2006, der Anlagentyp wird weiterhin als gängige Laboranlage genutzt. Aktuelle Produktionsanlagen haben die gleichen Grundeigenschaften und sind lediglich größer. Zum Zeitpunkt des Projektantrags lag die Größe der erwendeten Waferträger, auch Boote genannt, bei 320-352 Wafern pro Boot (Wafergröße 156x156 mm, auch als „M0“ bezeichnet). Bei entsprechender Größe der Prozesskammer schien es naheliegend, dass die Boote noch weiter skalierbar sind, eine Kapazität von 520 Wafern erschien technisch naheliegend. Die Struktur der Boote hat sich seit ihrer Einführung in den Neunzigerjahren des letzten Jahrtausends wenig geändert: es ist ein Plattenstapel, lediglich die Größe der Platten und die Anzahl gestapelte Platten wurden erhöht.



Während der PECVD-Beschichtung erfahren nicht nur die Wafer die in den Plattenstapel gelegt wurden eine Beschichtung, sondern auch Bereiche des Plattenstapels die nicht durch Wafer bedeckt sind. Das ist bei der Abscheidung von nicht leitfähigen Schichten kein Problem, die Leitfähigkeit des Plattenstapels ändert sich nicht. TOPCon-Strukturen benötigen die Abscheidung von leitfähigen Schichten aus amorphem Silizium, die die Leitfähigkeit des Plattenstapels während der

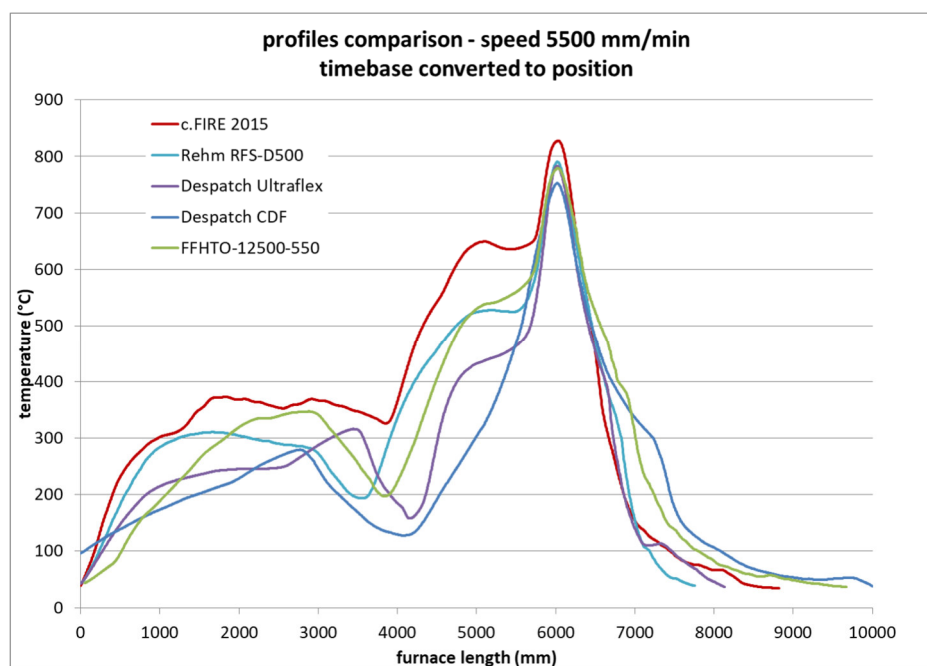
⁸ T. Pernau, „Impulse für die industrielle Produktion kristalliner Siliziumsolarzellen,“ Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS), Konstanz, 2003

Abscheidung verändern. Diese Veränderung wurde bei Laboranlagen bisher manuell kompensiert, indem während der Abscheidung die Betriebsspannung nachgestellt wurde. Die Plattenstapel waren konstruktiv noch nicht darauf ausgelegt, dass die Veränderung durch eine allmähliche Beschichtung mit einer leitfähigen Schicht unterdrückt wird. Zum Zeitpunkt des Projektstarts wurde das Hauptproblem an den Isolatoren des Plattenstapels lokalisiert: durch ungewollte Beschichtung werden diese leitfähig. Es gab bereits erste Labormodelle von Isolatoren, die begrenzt resistent gegen leitfähige Beschichtung waren und es war naheliegend, dass man diese weiterentwickeln kann.

In der PECVD-Prozessentwicklung waren die Ausfälle der Isolatoren ein wesentlicher Hinderungsgrund, die Prozesse waren selbst im Zeitbereich von 10-20 Minuten nicht stabil. Exakte Wiederholungen von Prozessen waren nur durch Tausch/Reinigung aller Isolatoren möglich. Mit der Entwicklung langzeitstabiler Isolatoren schien eine umfangreiche PECVD-Prozessentwicklung möglich, die bisher nur im langsameren, beidseitigen LPCVD-Verfahren mit erhöhten Temperaturen und deutlich mehr Zeitbedarf verfügbar war.

Kontaktfeueröfen

Feueröfen zum Einbrennen von siebgedruckten Kontakten sind ein standard-Produktionsgerät und erzeugen Temperaturprofile, die im allgemeinen recht ähnlich sind, hier zum Beispiel fünf verschiedene Modelle unterschiedlicher Hersteller:



Die Geräte sind sich auch im inneren Aufbau recht ähnlich. Diese Öfen benutzen Infrarotstrahler, die für eine schnelle Erwärmung der Wafer sorgen. Es war absehbar, dass der Feuerofen durch den Einsatz geeigneter Infrarotstrahler auf neue und veränderte Prozessanforderungen besser eingestellt werden kann. Zum Projektstart und auch während der ersten zwei Projektjahre war nicht bekannt, dass moderne Feueröfen eine zu schnelle Abkühlrampe aufweisen und dadurch zu viel Wasserstoff in den Wafer freisetzen. Das war zu Zeiten von multikristallinen Solarzellen hilfreich und gewünscht, für monokristalline Solarzellen aber eher zu viel des Guten.

1.4.3 Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes

Wie bereits angedeutet, war die Möglichkeit zur Herstellung von Solarzellen im Sinne des Projekts bekannt, und auch die prinzipiellen Vorteile, die erreicht werden können. Das betrifft sogar die PECVD direkt-Plasma Technologie: es wurden im Laborbetrieb schon Ende der 90er-Jahre a-Si Schichten im Sinne des Projekts hergestellt. Die Schichten, die die Anlagen produziert haben, kann man als Glückstreffer bezeichnen, denn vielfach war es nicht möglich, eine erfolgreiche Abscheidung 1:1 zu wiederholen. Die Boote waren zu unzuverlässig. Zur Zeit des Projektantrags hat sich gezeigt, dass es wohl hauptsächlich an den Isolatoren liegt, und dass es ein zusätzliches Potenzial bei der Ausgestaltung der Bootplatten gibt. Da es die Boote an sich schon für industrielle Anwendung in sehr großen Ausführungen gab, war es naheliegend, dass Schichten im Sinne des Projekts großtechnisch hergestellt werden können, sobald die Beschichtungsfahrten auch nach vielen Wiederholungen stabil sind. Also insbesondere keine Einzelprüfungen der Boote vor jeder Fahrt und häufiger Tausch / Reinigung vom Isolatoren, um die elektrischen Eigenschaften der Boote konstant zu halten.

Dazu kam, dass der PECVD-Beschichtungsprozess im PECVD-Parallelplattenreaktor streng einseitig ist, und idealerweise die gewünschte einseitige Beschichtung im Sinne des Projekts unterstützt. Das ist ein entscheidender Unterschied gegenüber LPCVD-Prozessen, die für ihre isotrope, konforme Beschichtung bekannt und geschätzt sind. LPCVD-Prozesse erzeugen eine ideal beidseitig identische Beschichtung, die hier nicht gewünscht ist. LPCVD-Prozesse müssen bei höheren Temperaturen (mindestens 550°C) ausgeführt werden und erreichen eine Beschichtungsrate von nur 1-3 nm/Minute, wo PECVD mindestens 10 nm/Minute erreichen kann.

Die Sauberkeit der Graphitplatten war bekannt und die Möglichkeit der Reinigung, es war nicht zu erwarten, dass sich eine Kontamination der abgeschiedenen, hochreinen Schichten ergeben könnte. Eine leichte Unsicherheit bestand bei der möglichen elektrischen Veränderung der Platten, durch die leitfähige Beschichtung. Das hat sich im Verlauf des Projekts als völlig unbegründet bewiesen.

Schließlich war da noch die Möglichkeit des Einsatzes von Dotiergasen, bekannt von Diffusion und LPCVD. Diese wurden als 1:1 umsetzbar für die PECVD-Anwendung eingestuft.

1.4.4 Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Zum Zeitpunkt des Antrags waren dem Konsortium keine Schutzrechte bekannt, die einer Verwertung der angestrebten Ziele im Wege stehen würden. Die Partner des Konsortiums hielten selbst Schutzrechte in den spezifischen Technologien, welche die Verwertung unterstützen. Eine detaillierte Patentrecherche sollte im Rahmen des Projektes durchgeführt werden.

Am Fraunhofer ISE existierten Patente und Patentanmeldungen zu Solarzellenprozessen und Strukturen, die für das Projekt relevant sind. Hier sind insbesondere DE102013219561A1 bzw. US9716204B2 (Verfahren zum Herstellen einer photovoltaischen Solarzelle...) sowie die laufenden Anmeldungen DE102013219564A1 und EP3120391A1 zu nennen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit im Konsortium hatte centrotherm die Möglichkeit, einzelne Versuche bei den Instituten ISC Konstanz und ISFH durchzuführen, da beide Laboranlagen von centrotherm betreiben. Das hatte den Vorteil, dass Entwicklungen bei Isolatoren und Booten in möglichst vielen Varianten getestet wurden.

2. Ausführlicher Bericht

2.1 Leistung und Ergebnisse in Arbeitspaketen

Die folgenden Abschnitte bewerten erbrachte Leistungen und erzielte Ergebnisse im Teilvorhaben centrotherm, insbesondere gewichtet aus der Sicht des Industriepartners.

Die Ergebnisse innerhalb der einzelnen Arbeitspakete sind chronologisch angeordnet.

2.1.1 Arbeitspaket 1 Bor-Emitter-Ausbildung und -Passivierung Im Projektmonat 1-6

Die centrotherm Laboranlage vom Typ c.DIFF X wurde bereitgestellt.

Im Projektmonat 7-12

Die centrotherm Laboranlage vom Typ c.DIFF X wurde bereitgehalten. Keine weiteren Aktivitäten im Berichtszeitraum

Im Projektmonat 13-18

Die centrotherm Laboranlage vom Typ c.DIFF X wurde bereitgehalten. Keine weiteren Aktivitäten im Berichtszeitraum

Im Projektmonat 19-24

Keine Tätigkeiten

Im Projektmonat 25-30

Es wurde eine Diffusionsanlage im centrotherm-Labor mit dem Dotiergas BCl_3 ausgestattet und in Betrieb genommen. Die Prozessergebnisse wurden im

im Projektmonat 31-36 erreicht.

Es wurde ein gegenüber bisher bekannten BBr_3 -Prozessen deutlich veränderter Prozessablauf erarbeitet, Details dazu siehe Abbildung 0. Die Prozessentwicklung wurde mit einem typischen Dotierprozess mit reduzierter Belegungstemperatur und erhöhter drive-in Temperatur gestartet. Zur Bewertung der Prozessqualität wurde die Leitfähigkeit der Waferoberfläche an 5 Punkten (Augenmuster eines Würfels) von Testwafern ermittelt, die in regelmäßigen Abschnitten über das Boot verteilt stehen. Typischerweise werden diese Abschnitte durch die Einteilung des Prozessrohres in Heizzonen vorgegeben, und es muss je Heizzone mindestens ein Wafer vermessen werden. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass trotz reduzierter Belegungstemperatur ein Überfluss an Dotierstoff Bor erreicht wurde, der mit dem Dotiergas BBr_3 niemals möglich gewesen wäre. In mehreren Rezeptläufen wurde ausgeschlossen, dass es sich bei der überschüssigen Dotierstoffmenge um eine Übersättigung der Prozesskammerwände oder der verwendeten Testwafer handeln könnte. Die Chemikalie BCl_3 zeigte sich definitiv besser in der chemischen Umsetzung und der Freigabe des Dotierstoffs Bor an die Wafer. Es wurde schließlich ein Prozess gefahren, bei dem das Dotiergas BCl_3 nur in 10-20 sec langen Pulsen abgegeben wurde, siehe Abbildung 0.

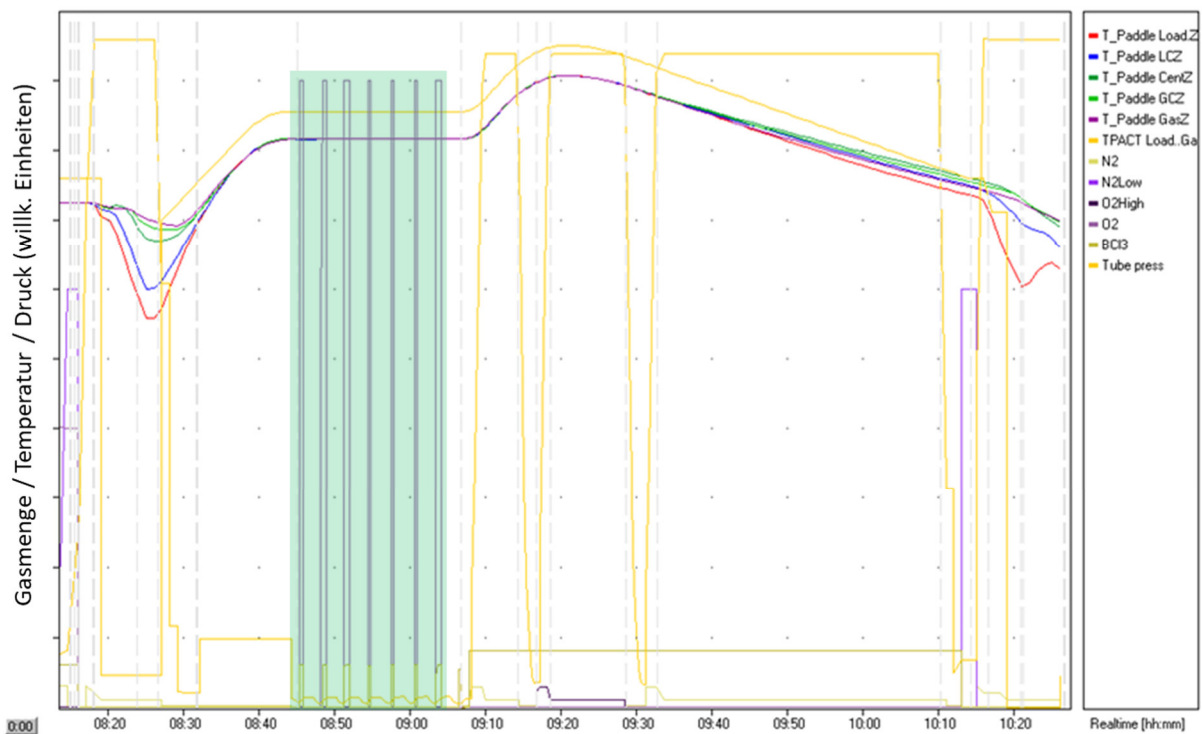


Abbildung 0: Grafische Darstellung des Verlaufs eines BCl_3 -Prozesses. Der Zeitabschnitt mit der gepulsten BCl_3 -Abgabe ist grün hinterlegt. Danach erfolgen zwei Oxidierungsschritte und ein Drive-in wie auch bei BBr_3 -Prozessen üblich. Die Prozesslaufzeit der beiden Prozesstypen ist daher praktisch die gleiche.

Das Prozessgas BCl_3 wird im Gegensatz zu BBr_3 direkt gasförmig aus der Prozessgasflasche in die Anlage geliefert. Da es sich um eine Vakuumanlage handelt, ist das Prozessgas innerhalb weniger Sekunden nach Einschalten in der Prozesskammer verfügbar. Kurze Pulse in 10-20 Sekunden Intervallen sind problemlos möglich. Mit dem klassischen Prozessgas BBr_3 ist so ein Intervallbetrieb nicht möglich, da es aus einem Verdampfergefäß (Bubbler) mit Vorlaufzeiten im Bereich 20-30 Sekunden geliefert wird. Kurze Intervalle der Gaslieferung in die Prozesskammer sind somit nicht möglich.

Außerdem erwähnenswert ist die Tatsache, dass das Borglas im BCl_3 Prozess noch dünner/geringer ausfällt als bei BBr_3 Prozessen und überhaupt nicht vergleichbar zur Dicke der Phosphorgläser aus POCl_3 -Prozessen. Das Borglas als Dotierstoffreservoir und damit Garant einer guten Homogenität des Prozesses ist praktisch nicht gegeben. Bor wird bei der Belegung unmittelbar in das Silizium freigesetzt und bildet nur zu einem ganz geringen Anteil Borglas. Dies ist wichtig für zukünftige Anwendungen, da es praktisch keine Dotierstoffreserve gibt, die in einer Lasernachbehandlung des Borglases freigesetzt werden könnte (selektiver Emitter).

Für Anwendungen im Sinne des Projekts wurden eine ausreichende Homogenität und Oberflächenkonzentration der Dotierung erreicht. Damit steht ein alternatives Prozessgas zu BBr_3 zur Verfügung.

Im Projektmonat 37-42

2.1.2 Arbeitspaket 2 Tunneloxid und Nasschemische Reinigung

Im Projektmonat 1-6

Für ein PECVD-Oxid lag ein erster Vorschlag vom Fraunhofer ISE vor. Auf einem kleinen Horizontalboot wurde eine bemerkenswerte Abscheiderate von 20 nm/min erreicht. Aufgrund der Druckverhältnisse während der Abscheidung und der erzielten implied V_{oc} -Werte auf Zellprecursoren von nur 660 mV lag ein Plasmaschaden vor. Proben mit zu geringer Lebensdauer konnten nachträglich verbessert werden durch

- entweder nachträgliche remote-Wasserstoffpassivierung (MIRHP)
- oder Rückätzen und Passivierung mit SiN_x

Die PECVD Oxid-Versuche wurden gemeinsam mit dem Projektpartner ISE auf einem industriety-pischen (großen) Vertikalboot der Größe 320 Wafer fortgesetzt. Dabei konnte eine nutzbare Arbeitsbedingung gefunden werden, die Schichtdicken im Bereich 4.5-5.5 nm erzeugt und damit über dem Zielwert von 2-3 nm liegt. Das Ziel ist leider nicht durch eine naheliegende Verkürzung der Beschichtungszeit erreichbar, da bei reduzierter Zeit die Homogenität stark einbricht. Eine Zugabe von NH_3 war nicht erforderlich und auch nicht hilfreich. Das große Vertikalboot an sich arbeitet stabiler als ein kleines Horizontalboot. Obwohl die erreichten Schichten etwas zu dick sind wurden Passivierungstests schon mit diesen dicken Schichten geplant.

Als weitere Alternative zur PECVD Oxidbeschichtung wurde entschieden die centrotherm PECVD Laboranlage mit den Prozessgasen O_2 und H_2O = Wasserdampf auszustatten.

Der Wasserdampf steht mit einem nur sehr geringen Dampfdruck von 30-40 mBar zur Verfügung und kann nicht durch einen Gasflussregler geregelt werden. Die gewünschte Flussmenge kann durch einen druck- und temperaturstabilisierten Behälter mit elektronischem Drosselventil bereitgestellt werden, siehe nachfolgende Abbildung 1. Der Behälter erreicht eine Temperaturstabilität von besser als ± 0.5 K auch bei laufender Wasserdampf-Entnahme. Der gewünschte Gasfluss ist im Bereich 1.5-4.5 slm einstellbar. Es wurden Stabilitätstests für bis zu 90 Minuten Oxidationszeit durchgeführt. Die erwartete Benutzungszeit für einen PECVD Oxidationsprozess liegt im Bereich 2-5 Minuten. Die eingestellte Flussmenge fällt während 90 Minuten H_2O Entnahme nur um 0.2 slm ab. Bei einer kurzzeitigen Entnahme von 2-5 Minuten ist keine Abweichung der Flussmenge messbar. Einschränkung der gewählten Lösung: Innerhalb eines Prozesses ist nur eine festgelegte H_2O -Menge verfügbar, die Einstellung auf einen anderen Sollwert benötigt 24 Stunden Stabilisierungszeit. Für kurzfristige Anpassungen muss der Prozess durch Zugabe von O_2 oder N_2 balanciert werden. Zusammen mit dem üblicherweise in PECVD Anlagen sehr genauen Druckregler ist nach wie vor eine sehr genaue und kurzfristige Korrektur des H_2O bzw. O_2 Partialdrucks möglich. Es ist nach wie vor möglich die Oxidationsrate in der Nukleationsphase gezielt abzusenken, ohne dabei die eingespeiste Plasmaleistung zu drosseln. Das war in den N_2O -Oxidprozessen bisher nicht möglich. Die unumgängliche Drosselung der Plasmaleistung in N_2O -basierten Prozessen konnte nur unter erheblichen Einbußen bei der Beschichtungshomogenität vorgenommen werden.

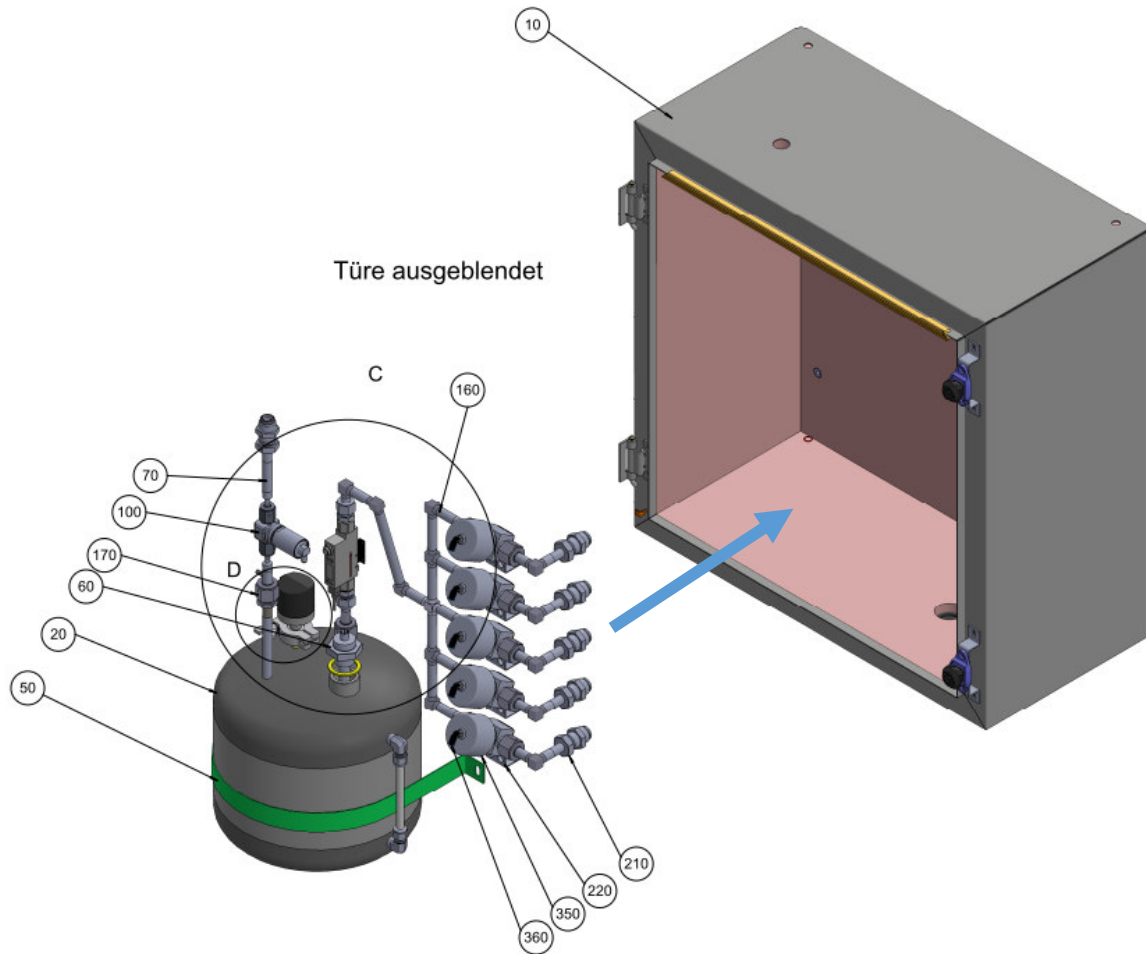


Abbildung 1: druck- und temperaturstabilisierter Wasserbehälter, der bis zu 5 Prozesskammern mit H₂O als Prozessgas versorgen kann. Aufgrund der Stabilisierungsmaßnahmen ist ein Dauerbetrieb an mehreren Kammern parallel denkbar.

Im Projektmonat 7-12

Die Benutzungszeit für einen PECVD Oxidationsprozess wurde auf 100 sec beschränkt.

Die Freigabe zur Anwendung eines O₂-Plasma Voroxids wurde auf bis zu 100 mBar erhöht (vorher nur 5 mBar).

Um die Graphitboote nicht durch ein oxidierendes Vorplasma zu schädigen wird eine Vorbelegung der gesamten Graphitstruktur vorgenommen. Die abgeschiedene Kombinationsschicht aus Siliziumkarbid und Siliziumnitrid schützt alle Bootteile die einem Oxid-Plasma ausgesetzt werden. Diese Vorbelegung ist mit bisher bekannten Beschichtungsprozessen kompatibel und wird bereits genutzt, um die Bootlebensdauer im Alltagsbetrieb zu erhöhen.

Im Projektmonat 13-18

Es lag ein weiterer Prozessvorschlag vor, um das PECVD-Oxid mit Abscheideparametern zu erzeugen, die sehr ähnlich zu etablierten Oxinitrid-Prozessen sind (klassisches Abscheideverfahren, Teil der $AlO_x-SiON_x-SiN_x$ Schichtkombination). Erste Schichten konnten mit sehr guter Homogenität abgeschieden werden, sie sind mit 6-10 nm Schichtdicke aber noch zu dick.

Der im vorigen Projekthalbjahr erarbeitete Vorschlag erfordert ein neu entwickeltes Abscheideverfahren mit hohem Prozessdruck und reinem Sauerstoff. Es standen aber nur zwei Laboranlagen zur Verfügung, die sauerstoffbasierte Oxide bei hohem Druck abscheiden können. Aufgrund der guten Ergebnisse im klassischen Abscheideverfahren wurde der sauerstoffbasierte Prozess bei hohem Druck nicht weiter verfolgt und stattdessen das klassische Verfahren angewendet. Nur wenn in der weiteren Entwicklung auf klassischem Wege dünne Schichten nicht erreicht werden können oder die Oberflächenpassivierung nicht ausreicht soll auf den reinen Sauerstoff-Prozess ausgewichen werden.

Im Projektmonat 19-24

Aus bisherigen Versuchen liegt ein Prozessvorschlag vor, um ein PECVD-Oxid mit Abscheideparametern zu erzeugen, die sehr ähnlich zu etablierten Oxinitrid-Prozessen sind und mit einer Silanhaltigen Atmosphäre erzeugt werden. Die Schichten konnten mit sehr guter Homogenität abgeschieden werden, sie sind mit 6-10 nm Schichtdicke aber viel zu dick für ein Tunneloxid. Das Problem ist die Anwesenheit von Silan, das eine hohe Abscheiderate von 5-10 nm pro Minute erreicht. Die erwünschte Schichtdicke für ein Tunneloxid wird bereits in der Nukleationsphase der PECVD-Abscheidung erreicht. In dieser Phase der Abscheidung kann keine kontrollierbare Begrenzung der Schichtdicke auf 1-2 nm erreicht werden.

Die alternativen Methoden sind Abscheideverfahren ohne Silan, mit entsprechend geringerer Abscheiderate. Es stehen mehrere Wege zur Verfügung:

- Reine Sauerstoffbehandlung nahe Atmosphärendruck (voraussichtlich erreichbare Schichtdicke < 1 nm, zu gering)
- Niedertemperatur-Feuchtoxidation mit der Wasserquelle aus Abbildung 1
- Ozon-Behandlung im Vakuum oder nahe Atmosphärendruck⁹
- Wiedereinführung eines milden Vorplasmas

Der Test der Ozon-Behandlung erfordert weitere Umbauten an der Laboranlage. Zusammen mit dem Hersteller MKS wurde die Auslegung eines Testaufbaus gestartet.

Wesentlicher Erkenntnisgewinn im Projektmonat 19-24

Die Wiedereinführung eines milden Vorplasmas konnte erfolgreich durchgeführt werden: Ausgangspunkt war die an sich schon milde Al_2O_3 -Schichtabscheidung. Das ist die bisher bekannte 40 kHz direkt-Plasma Schichtabscheidung mit der geringsten Störzustandsdichte an der Oberfläche (minimaler Plasmaschaden). Für die Oxidabscheidung wird eine 1:1 Gasmischung aus O_2 und

⁹ Liu et al., 24.4% industrial tunnel oxide passivated contact solar cells with ozone-gas oxidation Nano SiO_x and tube PECVD prepared in-situ doped polysilicon ,<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111803>

Argon bzw. N₂O und Argon eingeleitet und ein Plasma mit sehr geringer Leistung gezündet. Es war bereits 1/10 der Plasmaleistung der Al₂O₃-Schichtabscheidung ausreichend. In Analogie zu klassischen Siliziumnitridabscheidungen mit NH₃-Vorplasma, wurde die neue, milde Plasma-Oxidation auch als Vorplasma eingestuft.

Die Oxidationsrate beträgt 1 nm/Minute mit der N₂O-basierten Gasmischung und erreicht eine Schichthomogenität von < 16%, Lebensdauerproben erreichen in der QSSPC-Messung eine iV_{oc} von 720 mV. Die O₂-basierte Gasmischung erreicht bei einer Oxidationsrate von 1.3 nm/Minute eine Schichthomogenität < 10 % und eine iV_{oc} von 725 mV. Die iV_{oc}-Messung erfolgte jeweils nach Feuern. Das Schichtwachstum ist voraussichtlich bei ca. 4 nm Schichtdicke selbst-stoppend. Dies ist bereits zu dick für ein Tunneloxid, Für die erwünschte Passivierungsleistung genügt eine Schicht von 1-2 nm, die nach damaligem Erkenntnisstand auch eine ausreichende Tunnel-Leitfähigkeit erreichte. Die angestrebte Abscheidezeit war 100 Sekunden. Aus Gründen der optimalen Homogenität muss das Vorplasma als Beschichtungsschritt direkt vor einer dickeren Deckschicht (mindestens 30 nm) angewendet. Die Proben waren zu diesem Zeitpunkt schon fast 30 Minuten in der evakuierten Beschichtungskammer und die ungeschützte Probenoberfläche der unkontrollierten Ausdiffusion von den Kammerwänden ausgesetzt. Trotzdem konnten mit Lebensdauerproben akzeptable Passivierungsleistungen erreicht werden. Die Lebensdauerproben wurden gem. Abbildung 2 prozessiert.

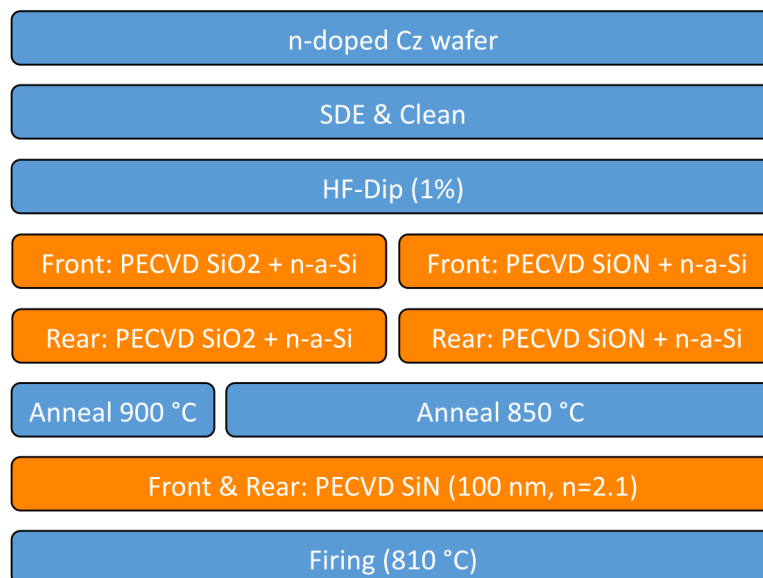


Abbildung 2: Prozessdiagramm zur Herstellung von Lebensdauerproben mit neu eingeführtem Vorplasma-Oxid.

Bei Referenzproben wurde die Voroxidation in der PECVD-Anlage weggelassen und durch ein klassisches Annealing-Oxid ersetzt. Damit sind die Proben auch bei Beladung und Aufheizphase in der PECVD-Anlage geschützt. Die Proben haben zusätzlich eine bekannt gut passivierende SiNx-Deckschicht erhalten, die aufgrund ihrer Abscheidetemperatur bei 450°C ebenfalls schon einen Annealing-Effekt hat. Die Ergebnisse von klassischem Annealing-Oxid und mildem PECVD-Voroxid sind sehr ähnlich, siehe Abbildung 3.

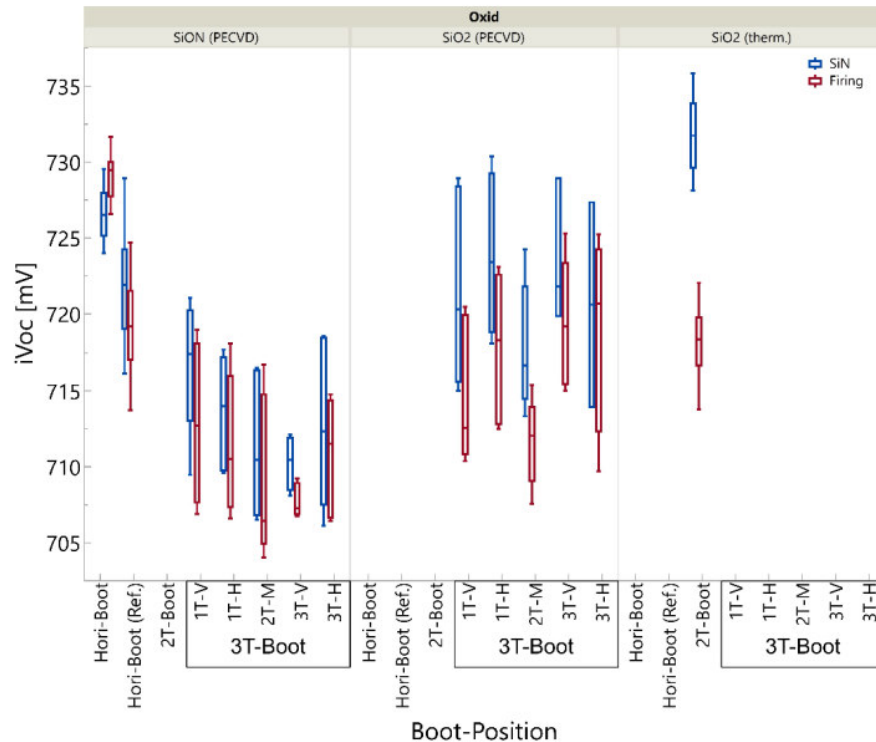


Abbildung 3: Ergebnisse der Lebensdauermessungen zur Klassifizierung des neuen Plasma-Voroxids. Voraussichtlich ist das Plasma-Voroxid mit einem hochwertigen Annealing-Oxid vergleichbar.

Insbesondere gibt es keinen großen Unterschied beim PECVD-Voroxid, wenn es anschließend noch gefeuert wird: Hinweis auf gute Oxidqualität. Es wurden leider insgesamt etwas zu wenig Proben prozessiert, so dass es durch die Verwendung unterschiedlicher Boote bei der PECVD-Abscheidung noch Unsicherheiten gibt. Insbesondere die kleinen Horizontalboote erzielen meistens bessere Werte als klassische Vertikalboote (2T und 3T), das könnte auch an Problemen bei der Beladung liegen, weil bei den Vertikalbooten ein prinzipiell höheres Risiko besteht, die Waferoberfläche zu verkratzen. Insgesamt kann im vierten Projekthalbjahr sicher festgestellt werden, dass die PECVD-Voroxide voraussichtlich gleichwertig mit Annealing-Oxiden sind, die in industrieller Produktion einen extra Oxidationsofen mit speziell sauberer Vorreinigung der Wafer benötigen.

Im Projektmonat 25-30

Wurden festgelegt, in welchem Verfahren das trockene Tunneloxid zukünftig aufgebracht werden soll: Die Reine Sauerstoffbehandlung konnte definitiv ausgeschlossen werden, weil die erforderliche Schichtdicke von 2 nm nicht erreicht wird, insbesondere als in-situ Anwendung in der Aufheizphase einer PECVD-Anlage. In dieser Anwendung wird nur eine Temperatur im Bereich 300-400°C erreicht.

Die Möglichkeiten des milden Vorplasmas wurden weiter untersucht und der prinzipielle Vorteil einer N₂O-basierten Gasmischung nachgewiesen. Nach damaligem Erkenntnisstand wurde ein stickstoff-dotiertes Oxid vermutet, das beim nachfolgenden Tempern mit höheren Temperaturen

belastet werden kann als ein hochwertiges thermisches Oxid. Aufgrund der mehrfach positiven Ergebnisse wurde das milde N₂O-Vorplasma in den vorgeschlagenen standard PECVD a-Si Abscheideprozesses aufgenommen.

Es wurde eine Designstudie für ein Ozongeneratorsystem durchgeführt, aufgrund der erwarteten hohen Kosten für die Nachrüstung in einer PECVD-Anlage wurde aber kein Testgerät angeschafft. Die erwartete Oxidqualität mit dem Ozongenerator ist geringfügig schlechter als bei einem thermischen Oxid, und damit einem N₂O-basierten Vorplasma in der PECVD-Anlage absehbar unterlegen. Bei den meisten PECVD-Anlagen ist N₂O ohne Mehrkosten Teil der Grundausstattung, weil diese Anlagen eigentlich für Aluminiumoxid / Oxinitrid-Prozesse ausgelegt sind. Die erheblichen Mehrkosten für einen Ozongenerator ohne wesentlichen Qualitätsgewinn sind nicht zu rechtfertigen, dieser Zweig der Entwicklung wurde beendet.

Da das N₂O-basierte Oxid für die Tunneloxid-Anwendung in Kombination mit a-Si Schichten, die getempert werden müssen, besser als ein thermisches Oxid abgeschnitten hat, ist es nach der Ansicht von centrotherm auch nicht sinnvoll ein nasschemisches Oxid weiter zu verfolgen. Die Mehrkosten wären noch höher als beim Ozon-basierten Oxid.

Im Projektmonat 31-36

In der weiteren Optimierung wurden die milden Plasma-Voroxide N₂O oder O₂ verglichen und bewertet. Bei entsprechender Prozesseinstellung ist es egal, ob die oxidierenden Sauerstoffradikale aus N₂O oder O₂ bereitgestellt werden. Ebenso greift das Verdünnungsgas N₂ oder Argon nicht in den Prozess ein, es können in beiden Varianten vergleichbare Schichten erzeugt werden. Wichtig bei der Behandlung ist nur, dass folgende Prozessgrenzen eingehalten werden:

- Die Plasmaleistung der Voroxide muss geringer sein als in den ohnehin schonenden Aluminiumoxid-Prozessen
- Verdünnung des sauerstoffhaltigen Prozessgases durch N₂ oder Ar mindestens im Verhältnis 1:1
- Prozessdruck nicht unter 1 mBar

Des Weiteren ergab sich, dass eine Vorplasma-Behandlung von länger als 2 Minuten keine Verbesserung mehr bringt. Das Oxid aus dem Vorplasma ist im Dickenbereich 3-4 nm selbststoppend, ähnlich einem nativen Oxid. Allerdings ist eine Dicke von 3-4 nm aus dem selbststoppenden Prozess zu dick für ein Tunneloxid, das Vorplasma muss also auf eine begrenzte Behandlungszeit mit guter Homogenität im Bereich 1.5-2 nm Schichtdicke eingestellt werden. Die Schichtdicke in diesem Bereich wird mit kleineren Versuchsbooten problemlos erreicht. Für größere Boote sind noch Optimierungen erforderlich.

Im Projektmonat 37-42

Die Optimierung der Tunneloxide wurde mit den jeweils größtmöglichen Booten für die Versuchsanlagen durchgeführt. Dabei wurde nun die Masse der Boote relevant und die somit benötigte Zeit, um die Boote gleichmäßig aufzuheizen. Entgegen bisheriger Annahmen in der Prozessoptimierung, dürfen die Voroxide nicht während der Aufheizphase, auf vergleichsweise kalten Bootplatten angewendet werden. Die ermittelte Homogenität auf kalten, großen Bootplatten ist nicht akzeptabel. Behandelte Wafer erreichten Voroxide im Dickenbereich 1-3 µm je nach

Waferposition. Es muss zwingend die bisherige Aufheizphase abgewartet werden, die Voroxide dürfen erst unmittelbar vor der a-Si Abscheidung aufgebracht werden. Die Anwendung eines Voroxids ist keine Möglichkeit, die Aufheizphase für einen a-Si Prozess zu verkürzen. Im weiteren Testverlauf ergab sich außerdem ein deutlicher Spannungseinbruch bei der Anwendung von N₂O-basierten Voroxiden. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde vermutet, dass es sich um eine Kontamination aus den verwendeten Booten handeln könnte. Die O₂-basierten Voroxide waren nicht betroffen und erreichten mit den gleichen, möglicherweise kontaminierten Booten die bisher gewohnte Passivierungsleistung. Die Ursache des Ausfalls der N₂O-basierten Voroxide konnte während der Projektlaufzeit nicht geklärt werden. Erst nach Ende der Projektlaufzeit ergaben sich Hinweise, dass der Ausfall der N₂O-basierten Voroxide aufgrund der elektrischen Kontakte der Boote passiert sein könnte. Die Kontakte sind aus Silber und können oxidieren wie Silberbesteck. Dadurch kann die Brennschicht während eines N₂O-basierten Voroxids nicht stabil gehalten werden, während ein O₂-basiertes Voroxid noch stabil bleibt. Das O₂-basierte Voroxid benötigt etwas weniger Betriebsstrom und das Brennverhalten von O₂-Plasma ist insgesamt etwas stabiler.

2.1.3 Arbeitspaket 3 Schichtabscheidung und Anneal Im Projektmonat 1-6

Ein völlig neuer Weg wurde beschritten um eine lokale PECVD-Abscheidung zu erzeugen:

Funktionsweise lokale PECVD-Abscheidung mit Masken

In einer direkt-Plasma PECVD Anlage entlädt sich das Plasma typischerweise nur zwischen den Platten einer Parallelplattenanordnung (Plattenstapel). Die Platten sind alle parallel zueinander. Die Platten werden in elektrischer Reihenfolge ABABAB... an eine zeitlich veränderliche Hochspannungsquelle mit den Ausgängen A und B angeschlossen. Das Plasma brennt bevorzugt nur in dem Bereich einer (zeitlich veränderlichen) Potentialdifferenz und die Abscheidung erfolgt bevorzugt entlang der Feldlinien. Diese wiederum verlaufen ideal senkrecht zu den Platten. Bringt man ein Dielektrikum (Isolator) zwischen die Platten, bricht die Plasmaentladung exakt in diesem Bereich zusammen. Das Dielektrikum erzeugt einen Schatten, in dem keine Feldlinien mehr existieren können. Wenn man ein dünnes Dielektrikum (Glasmaske) genau genug auf einem Wafer fixiert, kann damit eine exakte Unterdrückung der Plasmaabscheidung auf einem Wafer erzielt werden, siehe nachfolgende Abbildung 3. Bei diesem Test wurden die Ränder und ein größerer Bereich in der Mitte abgedeckt. Der Wafer ist weiterhin silbergrau in den unbeschichteten Bereichen. Die ungestörte Beschichtung ist hellblau. Es können hierbei sehr scharfe Kanten erzeugt werden, also bestimmte Bereiche sehr scharf von einer Beschichtung ausgeschlossen werden.

Sollen nur sehr schmale Bereiche beschichtet werden (d.h. große Bereiche darum herum ohne Plasmaentladung), verschlechtert sich scheinbar die Trennschärfe. Es ist auch deutlich weniger Abscheidung nachweisbar (nur dunkelblaue bzw. violette Schicht). Es handelt sich um einen Abstoßungseffekt parallel laufender Feldlinien, die außen laufenden Feldlinien verbiegen sich in den feldfreien Raum, erreichen einen geringeren Feldstärkegradient und damit weniger Plasmaentladung.

Maskierte Abscheidungen dieser Art können mit jeder bekannten Direkt-Plasmaabscheidung durchgeführt werden, insbesondere PECVD Oxiden und a-Si Abscheidung. Dieses Verfahren soll

weiter verfolgt werden insbesondere zur lokalen a-Si Abscheidung. Voraussichtlich können Strukturen erzeugt werden, die ähnlich fein ausgeführt werden können wie moderner Siebdruck, somit erscheint es möglich lokal beschichtete a-Si Finger als Grundlage für Siebdruckfinger herzustellen.

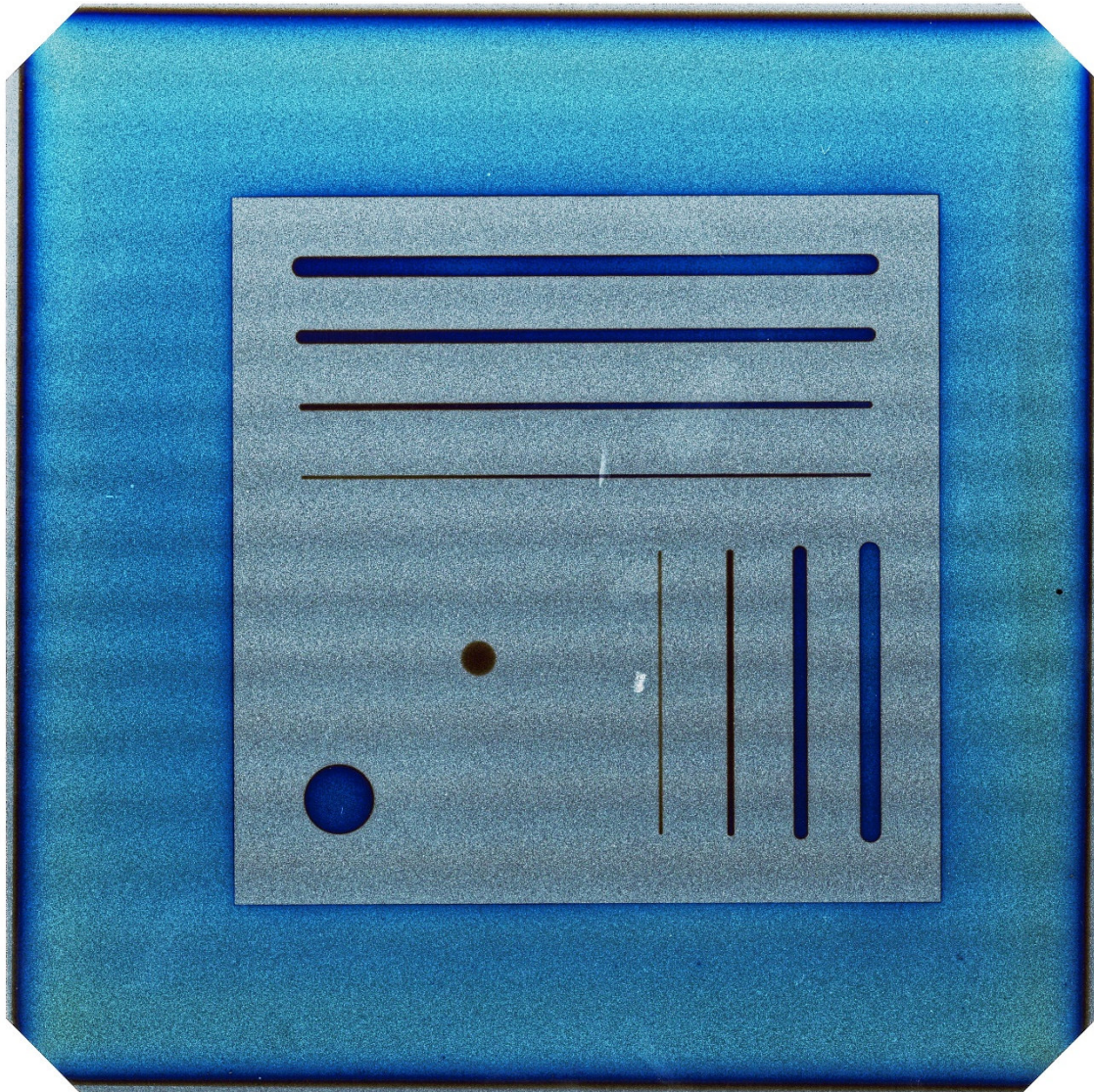


Abbildung 3: erster Versuch einer lokal begrenzten PECVD-Abscheidung mit verschiedenen geometrischen Formen. Die grauen Bereiche sind nicht beschichtet, weil sie von einer Glasmaske abgedeckt wurden. Die Abdeckung der Ränder mit einer Graphitmaske funktioniert auch, aber erzeugt eine schlechtere Randschärfe.

PECVD-Boote für Abscheidungen leitender Schichten

a-Si Schichten, insbesondere dotierte a-Si Schichten sind elektrisch leitfähig. PECVD-Boote die nach dem Schema ABAB... als Plattenstapel aufgebaut sind benötigen effektive Isolatoren zwischen den Platten, die eine Potenzialdifferenz von bis zu 1000 V haben können. Bei nichtleitenden

Beschichtungen haben sich Isolierkeramiken durchgesetzt. Diese werden durch leitende Beschichtungen kurzgeschlossen und die Plasmaentladung zwischen den Platten bricht zusammen. Aus den Vorarbeiten im Genesis-Projekt FKZ 0324274F ist mittlerweile ein Isolator mit hoch-tief Profil entwickelt worden der bei bis zu 50 Fahrten keine elektrische Veränderung durch Beschichtung gezeigt hat, siehe Abbildung 4 links. Mit diesem Bauteil wurde ein Vertikalboot entwickelt, das außerdem keine parasitäre Plasmaentladung zu den Wänden im Prozessrohr erlaubt, siehe Abbildung 4 rechts. Neben einer höheren Waferkapazität gegenüber bisher für a-Si Abscheidungen genutzten Horizontalbooten erlaubt ein Vertikalboot eine prinzipiell bessere Isolation zwischen benachbarten Platten. Man beachte dass die eigentlich nichtleitenden Quarzwände eines PECVD-Prozessrohres nach bereits 10-50 Beschichtungsfahrten mit a-Si leitend werden und parasitäre Entladungen provozieren können, wenn ungeeignete Boote eingesetzt werden.

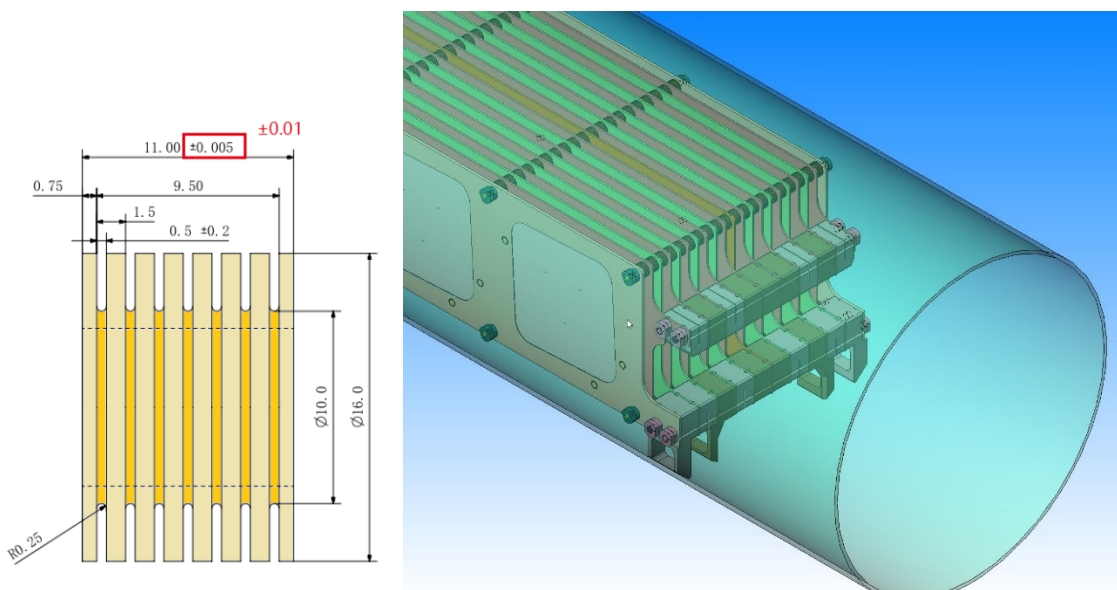


Abbildung 4 links: Konstruktionszeichnung eines voraussichtlich dauerhaft stabilen Isolators zur Abscheidung leitender Schichten in PECVD-Booten. Rechts ein weiterentwickeltes Vertikalboot basierend auf diesen Isolatoren, das parasitäre Entladungen zu den Rohrwänden unterdrücken soll.

Ermitteltes Wissen zur Auslegung von Horizontalbooten

Bei Horizontalbooten liegen die Wafer horizontal in geeigneten Vertiefungen in der Bootplatte. Aufgrund der durchgeführten Versuche müssen die Vertiefungen wie folgt ausgeführt sein:

- Der Waferausschnitt darf nur minimal größer sein als der Wafer selbst
- Der Waferausschnitt muss die Form des Wafers aufweisen
- Die Vertiefung des Waferausschnitts muss auf die Dicke des Wafers abgestimmt werden, so dass Waferoberkante und Plattenoberkante eine Ebene bilden

Die Position der Pins, die den Wafer stützen ist nicht relevant, es kann eine Position gewählt werden die die Handhabung erleichtert

Im Projektmonat 7-12

Weiterentwicklung lokaler PECVD-Abscheidung mit Masken

In einer direkt-Plasma PECVD Anlage entlädt sich das Plasma typischerweise nur zwischen den elektrisch leitenden Platten einer Parallelplattenanordnung (Plattenstapel). Wie bereits berichtet kann mit einer isolierenden Glasmasken eine exakte Unterdrückung der Plasmaentladung zwischen leitenden Platten erreicht werden. Der erste Versuch wurde im letzten Bericht dokumentiert. Es wurden verschiedene Maskentypen und Materialien getestet mit folgenden Ergebnissen:

- Bereits nach wenigen Testbeschichtungen mit Siliziumnitrid können sich die Masken verwinden
- Bei nicht korrekt aufliegenden Masken bildet sich am Maskenrand eine ungleichmäßige parasitäre Beschichtung: Corona. Der nicht korrekt beschichtete Bereich kann 0.1-0.9 mm breit ausfallen
- Die Corona fällt unterschiedlich aus je nachdem wie gut die Maske auf dem Wafer aufliegt
- Dickere Masken sind verwindungssteifer, erzeugen aber generell eine schlechtere Randschärfe
- Betrifft vor allem Glasmasken: je nach Schneidetechnik sind die Masken überhaupt nicht temperaturresistent und können bei geringster Belastung brechen
- Leitfähige Masken aus Metall: diese Masken werden sehr stark parasitär beschichtet. Da sie aus Metall sind verbiegen sie sich bereits nach einem Prozesslauf und erzeugen eine unzureichende Randschärfe

Ein Institutspartner der nicht Teil des Projektkonsortiums ist hat mittels Laserchemie geschnittene Glasmasken vorgeschlagen. Bisher ermittelte Vorteile:

- Kein Laserschaden in den Schnitten
- Die Form der Ausschnitte kann so gewählt werden, dass an der Schnittkante nur eine geringe Materialstärke auf dem Wafer aufliegt ($< 100 \mu\text{m}$ dick), dadurch ergibt sich eine extrem gute Kantenschärfe
- Die Dicke der Maske selbst darf größer gewählt werden (aktuell bis $450 \mu\text{m}$ getestet), dadurch erreicht man eine sehr hohe Stabilität der Maske

Bei centrotherm wurden vor allem Masken der Dicke $250 \mu\text{m}$ getestet. Die Abscheidequalität war so gut, dass die Bilder auch zu Werbezwecken verwendet wurden.

In einem Horizontalboot können Wafer und Maske mit einer Genauigkeit von besser als 0.5 mm übereinander gelegt werden. Es wurden daher Glasmasken mit einer möglichen Kontaktstruktur für Solarzellen mit bis zu $3 \mu\text{m}$ starken a-Si Schichten belastet, siehe Abbildung 5.

Im Horizontalboot fällt eine mögliche Verformung der Maske besonders auf. Deswegen wurde die Position der Maske auf dem Wafer untersucht, noch bevor der Wafer entnommen wurde, siehe Abbildung 6. Es ist noch keine Verformung erkennbar, obwohl bereits die 20-fache Dicke einer typischen a-Si Abscheidung abgeschieden wurde.

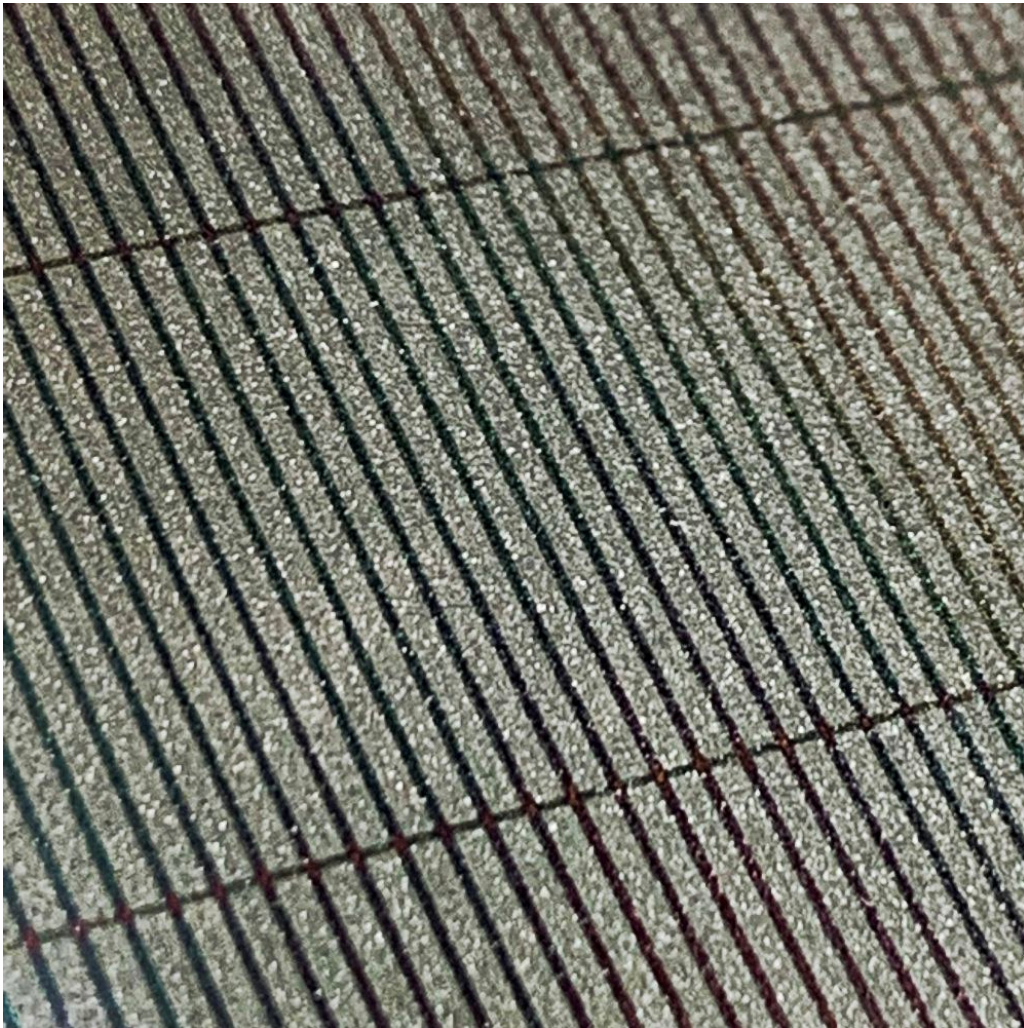


Abbildung 5: Testbeschichtung mit 3 μm $\alpha\text{-Si}$ auf $c\text{-Si}$ Wafer. Zur Steigerung des Kontrasts wurde der Wafer zuvor mit Siliziumnitrid (dunkelviolet) ganzflächig beschichtet. Die lokal begrenzten $\alpha\text{-Si}$ Flächen erscheinen grau vor dunklem Hintergrund.

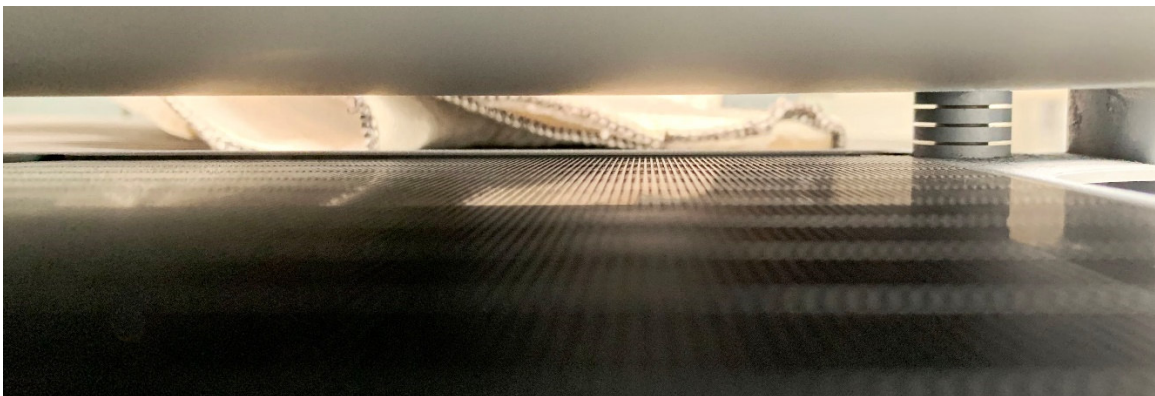


Abbildung 6: Überprüfung von Wafer und Maske nach der Abscheidung im Horizontalboot, bevor der Wafer mit einer Pinzette bewegt wurde. Das glänzende Gitter ist die Maske, der Wafer liegt darunter. Es ist noch keine Verformung der Maske erkennbar, obwohl die 20-fache Dicke einer normalen Abscheidung gewählt wurde.

Weiterentwicklung der PECVD-Boote für Abscheidungen leitender Schichten

Aufgrund der industriellen Anwendbarkeit lag der Fokus auf Vertikalbooten. Die im ersten Projekthalbjahr entwickelten Isolatoren wurden auf Dauerfestigkeit, d.h. zuverlässige Erhaltung der Isolationswirkung getestet, siehe Testanordnung in Abbildung 7:

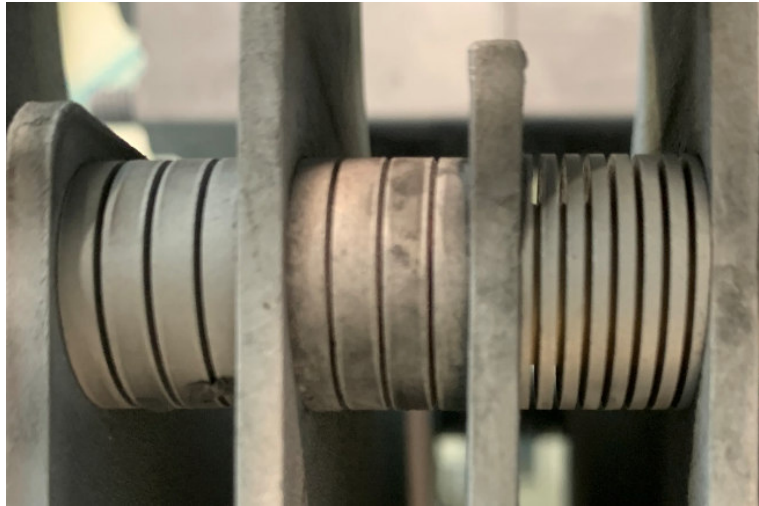


Abbildung 7: Langzeittest zum Nachweis eines dauerhaft stabilen Isolators zur Abscheidung leitender Schichten in PECVD-Booten. Rechts der voraussichtlich beste Isolator.

Ermitteltes Wissen zur Auslegung von Horizontalbooten

Bei Horizontalbooten liegen die Wafer horizontal in geeigneten Vertiefungen in der Bootplatte. Die Anforderungen an die Ausführung der Platten wurden im ersten Projekthalbjahr ermittelt. Aufgrund der durchgeführten Versuche ergaben sich im zweiten Halbjahr weitere Erkenntnisse:

- *Isolatoren zwischen den Platten: können von Vertikalbooten übernommen werden*
- *Fußpunktisolatoren: zwischen der Grundplatte und dem entgegengesetzt gepolten Kontakt herrscht die größte Feldstärke. Dieser Schwachpunkt kann bauartbedingt nicht umgangen werden. Es sind zusätzlich verstärkte Isolatoren erforderlich.*
- *Laborbetrieb: möglichst kleiner, kompakter Aufbau gewünscht der leicht zerlegt werden kann. Die oberen Platten können in nur 1-2 Minuten Montagezeit entnommen werden.*

Es wurden zwei Laborboote aufgebaut. Aufgrund der gewonnenen Erfahrung wird ein Boot gem. Abbildung 8 vorgeschlagen.

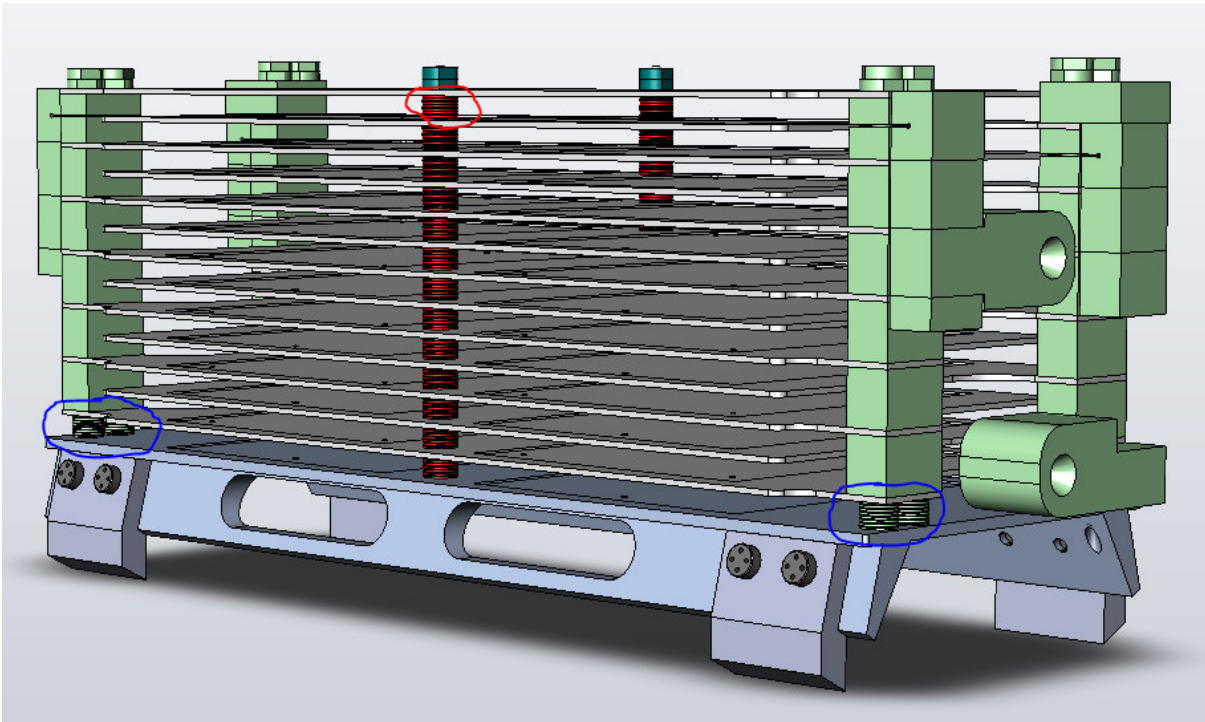


Abbildung 8: kleines Horizontalboot aufgrund neuester Erkenntnisse. Zwischen der Grundplatte und den Kontaktbalken zum oberen Plasmaanschluss müssen verstärkte Fußpunktisolatoren zum Einsatz kommen (blau markiert). Als Isolatoren zwischen den Platten genügen die bisher bekannten Isolatoren (rot markiert).

Im Projektmonat 13-18

Weiterentwicklung der Masken-Technologie

In einem Horizontalboot können Wafer und Maske mit guter Genauigkeit übereinandergelegt werden, solange das Boot nicht heftig bewegt wird. Das kann insbesondere bei überlangen Beschichtungszeiten zur Ermittlung der maximalen Schichtdickenbelastbarkeit aufrecht erhalten werden. Die Belastungsversuche mit extrem dicker Beschichtung wurden weitergeführt, bis zu einer abgeschiedenen Schichtdicke von 14 μm auf einer 150 μm dünnen Glasmaske. Diese Maske hat die letzte Beschichtungsfahrt noch überstanden und ist erst bei dem Versuch gebrochen, sie vom Wafer abzuheben, siehe Abbildung 9. Der Bruch entstand an einer konstruktiven Schwachstelle der Maske. Das Maskenlayout wurde verändert um diese Schwachstelle zu vermeiden.

Die Maske wurde in einem Horizontalboot prozessiert, um eine mögliche Verformung der Maske zu erkennen. Deswegen wurde wie in Abbildung 6 gezeigt die Position der Maske auf dem Wafer untersucht, noch bevor der Wafer entnommen wurde. Auch bei 14 μm Beschichtung auf der dünnst möglichen Maske wurde keine Verformung erkannt. Die maximal abgeschiedene Schichtdicke war das 100-fache der Schichtdicke, die für eine Einzelschicht nötig ist. Damit wurde nachgewiesen, dass selbst die dünnste Glasmaske voraussichtlich mit mehr Schichten belastet werden kann als die bisher akzeptable Schichtbelegung eines Prozessbootes. Das Prozessboot darf nach derzeitigem Kenntnisstand nur mit 80 Einzelschichten belastet werden.



Abbildung 9: Testbeschichtung mit $14\ \mu\text{m}$ $\alpha\text{-Si}$ auf $150\ \mu\text{m}$ Glasmasken. Die Maske ist erst beim Entladen aus dem Boot gebrochen, während der Abscheidung war die Maske noch intakt. Der Bruch erfolgte ausgehend von einer konstruktiven Schwachstelle der Maske. Diese Schwachstelle soll bei den zukünftigen Maskenlayouts vermieden werden.

Bei Horizontalbooten liegen die Wafer horizontal in geeigneten Vertiefungen in der Bootplatte. Wird eine Glasmasken direkt auf den Wafer gelegt, besteht die Gefahr einer Fehlpositionierung mit Abweichungen wie in den Abbildung 10 (Auswertung) und 12 (Makro-Fotografie) gezeigt. Aus diesem Grund wurden Graphitplatten mit Haltepins für Glasmasken entworfen, die eine Fehlpositionierung weitestgehend verhindern, siehe Zeichnung in Abbildung 11. Es wurden 3 Testplatten bestellt.

Es wurde außerdem geprüft, wie Wafer und Maske ins Boot eingelegt werden können, unter Verwendung eines typischen Beladeroboters. Bei getrennter Handhabung von Wafer und Maske würde sich die Anzahl Bewegungsschritte, die der Roboter durchführen muss, praktisch verdoppeln. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass der Roboter die Maske alleine nicht richtig greift. Diese Fehlermöglichkeit unterbleibt, wenn Maske und Wafer gleichzeitig gegriffen werden. Maske und Wafer müssen passend gestapelt und zentriert bereitgestellt werden, danach erfolgt das Einsetzen ins Boot wie bei klassischer Waferbeladung. Die Anzahl Bewegungsschritte ist nicht erhöht, Eine mögliche gemeinsame Halterung für Pin und Maske, die bei Vertikalbooten eingesetzt werden kann, lag im dritten Projekthalbjahr noch nicht vor. Diese muss zunächst in Versuchen mit den einfacher bestückbaren Horizontalbooten entwickelt werden. Ein erster Schritt dazu ist die neu geplante Horizontalbootplatte gemäß Abbildung 11.

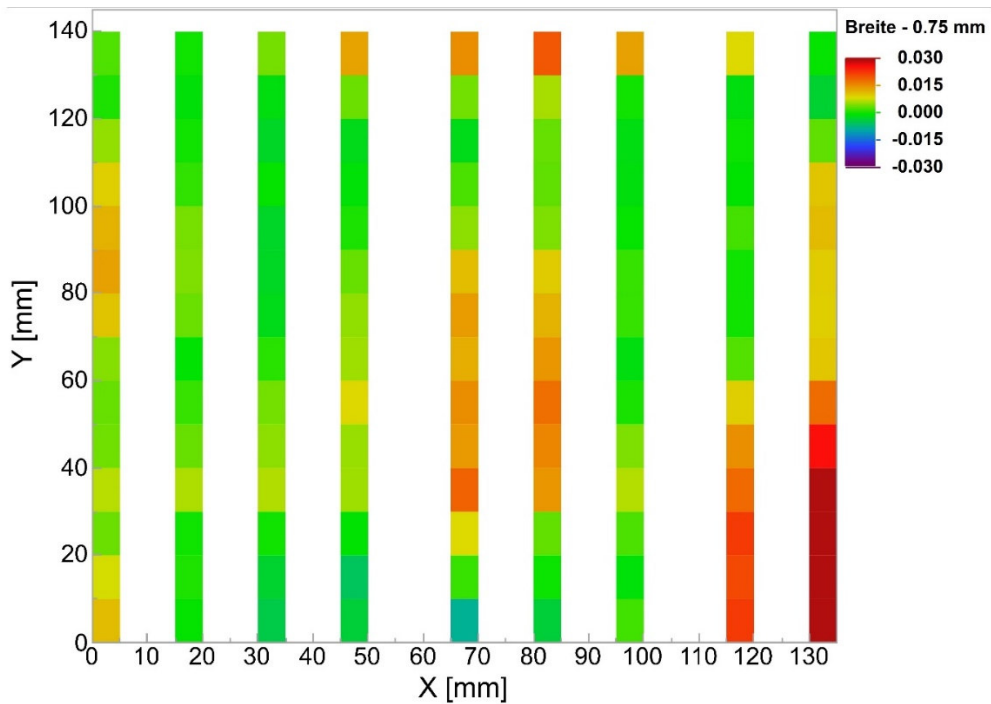


Abbildung 10: Abgleich von abgeschiedener Schichtgeometrie und zukünftigem Siebdruck. Grün: der Siebdruck würde die Linien aus Poly-Silizium ideal treffen. Die roten Bereiche zeigen eine Maskenverformung oder die Maske wurde nicht richtig aufgelegt. Die betroffene Maske ist leider ebenfalls bei der Entnahme gebrochen und konnte nicht nachgemessen werden.

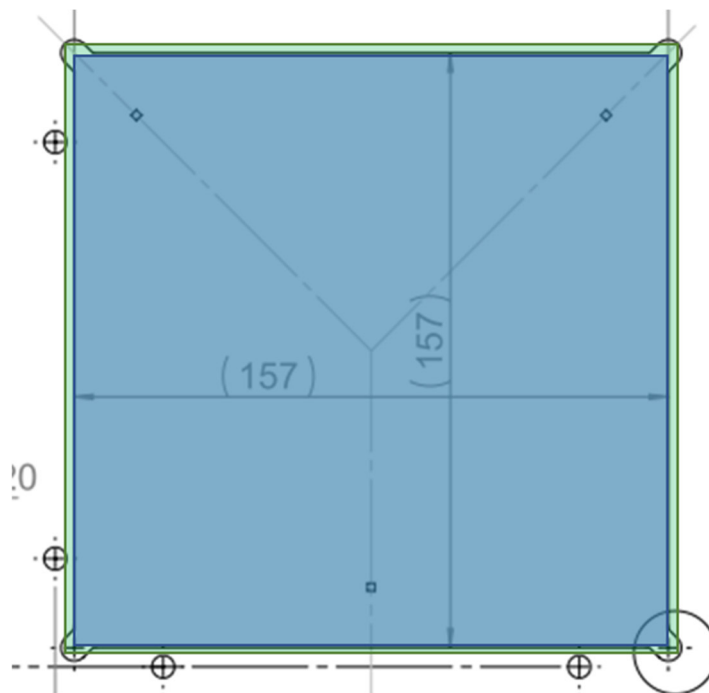


Abbildung 11: Ausschnitt aus der neu geplanten Horizontalbootplatte mit Wafer (blau) und Maske (grün). Der Wafer liegt in der bisher bekannten Aussparung, deren Toleranz aber verkleinert wurde. Die Maske liegt an den mit „+“ markierten Pins an.

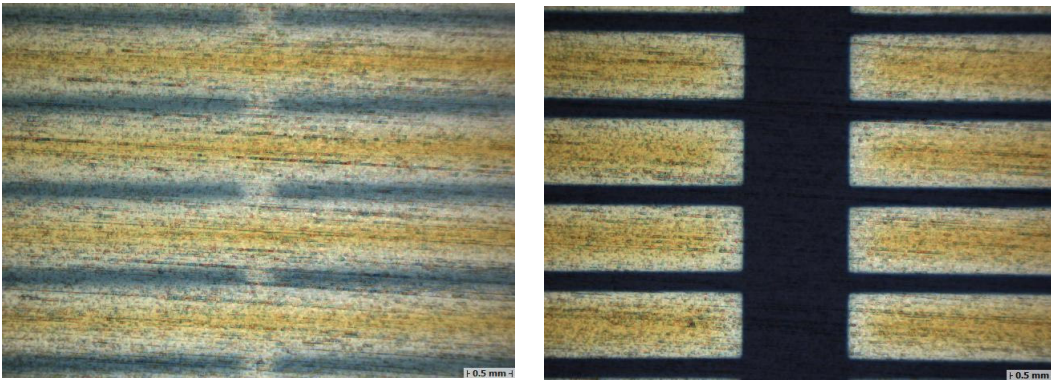


Abbildung 12: links beschichteter Wafer direkt nach PECVD, rechts der Wafer ablatiert und vorbereitet für die Kontaktierung.

Weiterentwicklung der PECVD-Boote für Abscheidungen leitender Schichten

Erkenntnisstand im Projektmonat 13-18 ist, dass Isolatoren zumindest in Teilbereichen die parasitäre Abscheidung leitender Schichten verhindern können. Die Modellbilder für mögliche Isolatoren sind in Abbildung 13 zu sehen. Der im Projektmonat 13-18 verwendete Isolator ist links gezeigt. Der Isolator wird während der Abscheidung von reaktiven Teilchen umspült und kann beschichtet werden, wo diese Teilchen geradlinig aus der Gaswolke heraus die Oberfläche des Isolators treffen. Dadurch entsteht die rot dargestellte parasitäre Beschichtung. Es ist möglich, dass Gasteilchen auch tief in die Schlitze des Isolators vordringen und sich dort abscheiden. Nach damaligem Entwicklungsstand waren 2 mm tiefe Schlitze vorgesehen, die von reaktiven Teilchen überwunden werden können, wenn sie eine mittlere freie Weglänge von 2 mm im aktivierten Zustand überwinden können. Das ist wenig wahrscheinlich, aber nicht unmöglich. Es muss also eine Barriere geschaffen werden, deren Überwindung eine deutlich größere mittlere freie Weglänge der reaktiven Teilchen erfordert. Diese Barriere ist in Abbildung 13 rechts gezeigt. Die Barriere soll in Form von verschieden geformten Schutzhülsen erreicht werden und selbst reaktive Teilchen mit einer mittleren freien Weglänge von 7-9 mm aufhalten. Der Projektpartner ISE hatte bereits zu Beginn des dritten Projekthalbjahres die Arbeiten dazu aufgenommen. Aufgrund dieser Ideen sollten weitere Modelle entwickelt und getestet werden.

Die weiterentwickelten Isolatoren wurden auch dem Fraunhofer ISE zur Verfügung gestellt, um sie zu testen. Bei diesen Versuchen wurden Schichten erzeugt, die den Meilenstein 3.4 erfüllen: „Prozess für einseitige PECVD-Abscheidung entwickelt, Stromfluss $< 2 \text{ mA/cm}^2$ bei Rückwärtsbelastung der Zellen mit 12V“. Schichten in dieser Qualität können im centrotherm-Labor nicht erreicht werden, da die Wafer nicht direkt vor der PECVD-Abscheidung gereinigt werden können.

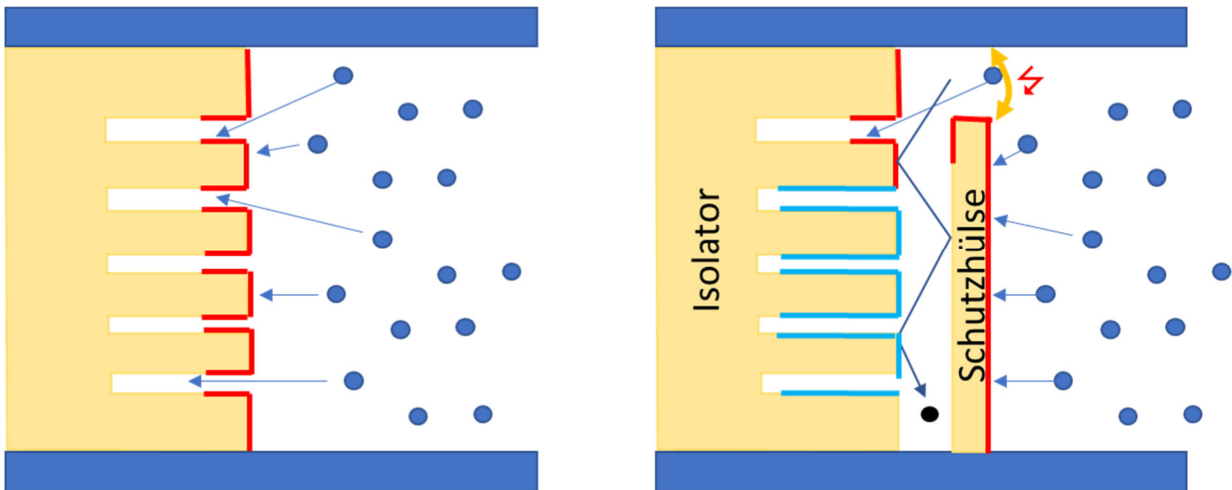


Abbildung 13: links klassischer Isolator wie er im dritten Projekthalbjahr zum Einsatz kommt. Je nach Reaktivität und Lebensdauer der reaktiven Teilchen kann eine parasitäre Beschichtung (rot) auch in tiefen, engen Schlitze des Isolators erfolgen. Der rechte Isolator wird durch eine zusätzliche Barriere geschützt, reaktive Teilchen haben eine deutlich größere Wegstrecke zurückzulegen um eine parasitäre Abscheidung zu erzeugen. Dies kann durch geeignete Formgebung von Isolator und Barriere optimiert werden. Zumindest ein Teilbereich des Isolators wäre nur durch Mehrfachstöße zu erreichen, bei denen die Teilchen aber ihre Reaktivität verlieren (schwarzes Teilchen).

Im Projektmonat 19-24

Weiterentwicklung der lokalen PECVD-Abscheidung mittels Glasmasken

Die Horizontalbootplatten mit Haltepins für Masken wurden beschafft und getestet. Die Genauigkeit der Halterung ist besser als 0.1 mm über die gesamte Bootplatte.

Leider hat sich gezeigt, dass die größte Ungenauigkeit in dem System die Position des Wafers ist. Deshalb wurden die Masken mit Justierkreuzen versehen, die von nachfolgenden Positionierungsschritten (Laser und Siebdruck) mit der gewünschten Genauigkeit von 0.1 mm oder besser erkannt werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Auflagepins der Platten (rote Kreise in Abbildung 14) einen dünnen Wafer ($< 150 \mu\text{m}$) durch sein Eigengewicht verbiegen. Die Justierkreuze am Waferrand werden unscharf. Für a-Si Abscheidungen bedeutet es keinen Nachteil, wenn man die Auflagepins an den Booten weglässt. Ein Test mit manuell herausgeschnittenen Auflagepins zeigte: Die Wafer liegen plan auf und die Justierkreuze werden scharf abgebildet, siehe Abbildung 15. Zukünftige, neue Horizontalbootplatten für Schichten im Sinne des Projekts sollen ohne Auflagepins für Wafer gefertigt werden. Bei bestehenden Platten können die Pins bei Bedarf manuell herausgeschnitten werden.

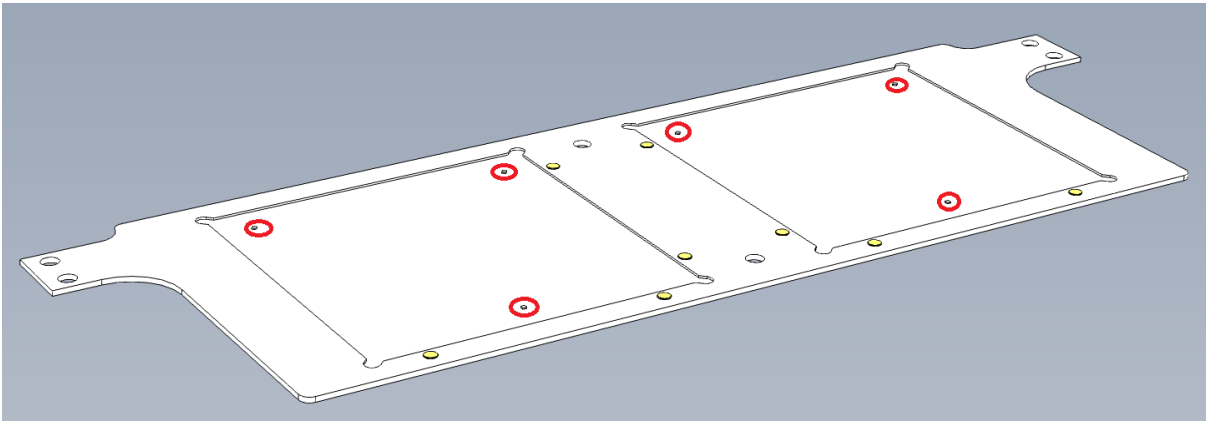


Abbildung 14: neu entwickelte Bootplatte für ein kleines Horizontalboot aufgrund neuester Erkenntnisse. Hinzugekommen sind die gelben Haltepins für Masken. Die rot markierten Auflagepins für Wafer wurden im Zuge der weiteren Optimierung entfernt.

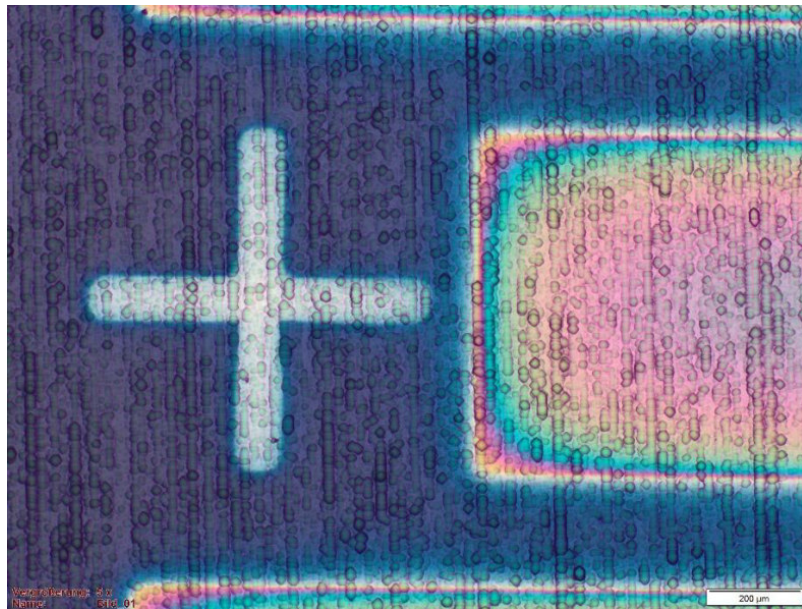


Abbildung 15: Justierkreuz auf einem Messwafer, der perfekt plan auf einer Bootplatte aufgelegt hat. Es war keine Lücke zwischen Wafer und Maske und damit keine Abbildungsfehler.

Eine mögliche gemeinsame Halterung für Wafer und Maske, die bei Vertikalbooten eingesetzt werden kann, wurde in Handarbeit hergestellt und getestet. Im Gegensatz zu den bisher geschilderten Vortests gibt es eine gemeinsame Anlegekante für Maske und Wafer. Die Beladeversuche wurden von Hand durchgeführt. Dabei ist eine Maske gebrochen, eine weitere Maske weist geringfügige Kratzer auf, siehe Abbildung 16. Die weitere Analyse ergab, dass die gebrochene Maske einen Vorschaden hatte und die Bruchstelle nahe, aber nicht an den Anlegepunkten lag. Eine Schädigung durch die Anlegepunkte ist wenig wahrscheinlich.

Trotzdem wurde entschieden die Anlegepunkte (Pins) weiter zu optimieren, ausgehend von Drittanbietern für centrotherm-kompatible Boote (Abbildung 17). Abbildung 17 rechts zeigt die bisherige Haltelösung für einen Wafer bis 0.3 mm Stärke. Der Pilzkopf des Pins kann erweitert werden bis voraussichtlich 0.5-0.6 mm Stärke, um Wafer und Maske aufzunehmen (links).

Pins gemäß Abbildung 17, die keine Klemmkräfte aufbringen, sind bei etlichen Benutzern bevorzugt, obwohl sie die Wafer schlechter kontaktieren (Inhomogenität, Beschichtungsfehler). Es entstehen keine mechanischen Beschädigungen am Wafer, weil er sich prinzipbedingt nicht verklemmen kann.

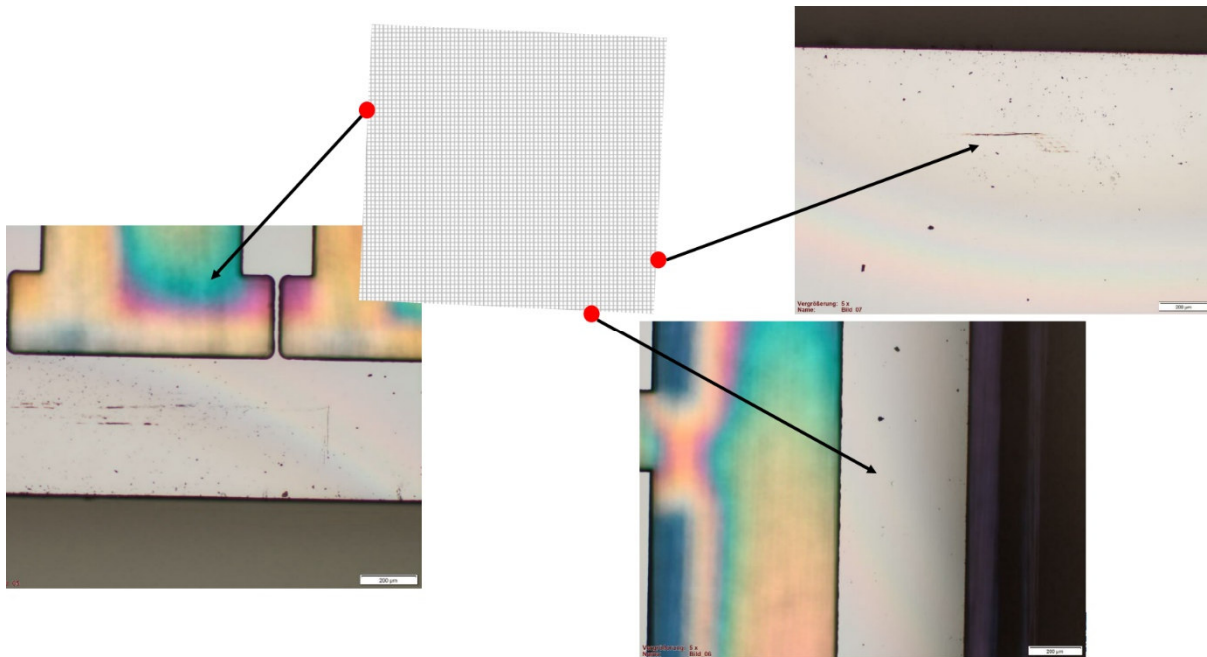


Abbildung 16: Schadenanalyse an Glasmasken, die gemeinsam mit dem Wafer in ein Boot eingelegt wurden. An einigen Anlegepunkten wurden Kratzer in der Maske erkannt. Der Wafer ist grau kariert gezeigt und darauf sind die Anlegepunkte in das Vertikalboot markiert. Die Mikroskopbilder zeigen nur die Ausschnitte direkt um den Anlegepunkt.

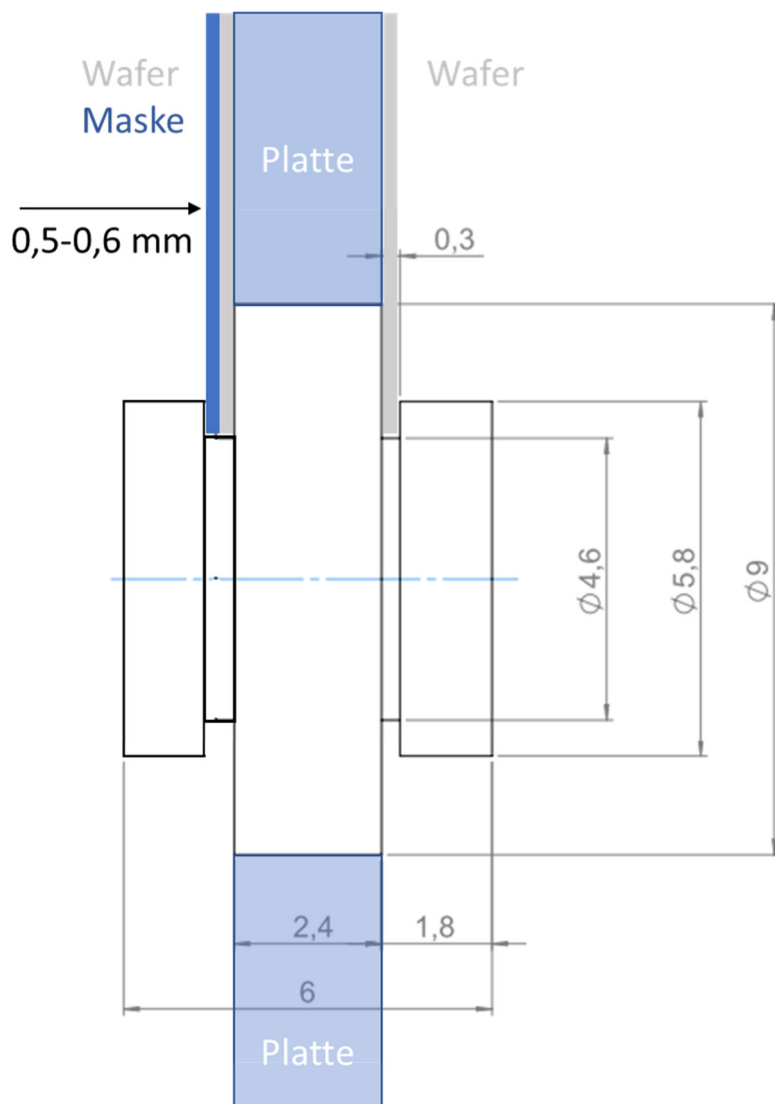


Abbildung 17, Pin eines Drittanbieters für centrotherm-kompatible Boote. Der Pin ist so breit gebaut, dass sich ein Wafer nicht verklemmen kann. Auf der rechten Seite die Standardanwendung mit bis zu 0.3 mm dicken Wafers, links die Erweiterung mit Wafer + Maske.

Weiterentwicklung der PECVD-Boote für Abscheidungen leitender Schichten, Isolatoren

Die Bootplatten wurden im Projektmonat 19-24 nicht weiter verändert, aber die Untersuchungen an den Isolatoren wurden weitergeführt. Es wurde ein Horizontalboot mit Anordnung der Isolatoren gem. Abbildung 13 verwendet. Insbesondere wurde die zusätzliche Barriere in Ringform um den Isolator getestet (siehe Abbildung 13 rechts). Diese zusätzliche Barriere ist wirksam gegen eine Beschichtung des Isolators im unteren, abgedeckten Bereich, birgt aber ein erhöhtes Risiko eines Kurzschlusses zwischen Schutzhülse und darüber liegender Platte, im Fall eines Horizontalboots. Bei einem Vertikalboot wurde dieses Risiko im vierten Projekthalbjahr noch nicht erkannt, mit der Begründung dass der Schutzring regelmäßig bewegt wird und es kein Risiko eines punk-

tuellen Kurzschlusses mehr gibt, sobald der Schutzring minimal verschoben wurde. Für Horizontalboote wurde schon damals aus Sicherheitsgründen entschieden, den Schutzring wegzulassen, und stattdessen die bisher schon bewährten, geriffelten Isolatoren rechtzeitig zu reinigen. Wird das Boot überwiegend zur Abscheidung von a-Si Schichten im Sinne des Projekts verwendet, ist die Reinigung in warmer Natron- oder Kalilauge schnell und einfach. Selbst stark dotierte Schichten veränderten den Isolator während einer Abscheidung nur wenig, und die Leistung bzw. die Abscheidezeit mussten nicht korrigiert werden. Außerdem wurde mit Isolationsmessungen am kalten Boot außerhalb der Anlage begonnen, um möglicherweise geschwächte, bereits geringfügig kurzgeschlossene Isolatoren zu erkennen.

Im Projektmonat 25-30

Die Entwicklung von Bootplatten gemäß Abbildung 14 musste geringfügig korrigiert werden. Die Wafer/Masken Kombination darf nicht zu tief liegen, um Störungen der Abscheidung an den Rändern von Wafer und Maske zu vermeiden. Es wurden einige korrigierte Bootplatten hergestellt und die Korrektur für alle zukünftigen Boote eingeplant.

Die Untersuchungen an den Isolatoren wurden mit anderen Projekten zusammengeführt. Für undotierte und schwach dotierte a-Si Schichten wurden Boote mit Anordnung der Isolatoren gem. Abbildung 13 links verwendet: gerillte Isolatoren mit vergrößertem Durchmesser. In dieser Anwendung sind die Isolatoren sehr langlebig und können mit Schichten bis 30 µm belegt werden. Es ist sogar eine leitende Schutzhülse (aus Edelstahl) möglich wie in Abbildung 13 rechts. Die leitende Schutzhülse hat ein gewisses Risiko ungewollter Entladungen. Über die Anwendungsphase steigt dieses Risiko schneller an als ein schleichender Kurzschluss des ungeschützten Isolators. Bei Bedarf kann dieser einfach und schnell in warmer Natron- oder Kalilauge gereinigt werden.

Bei Belastung der Isolatoren mit stärker leitfähigen Schichten ist ein geschützter glatter Isolator gem. Abbildung 13 rechts ausreichend. Die Schutzhülse muss aus Keramik gefertigt werden und darf eine gut leitfähige Abscheidung erfahren, erreicht dabei aber noch lange nicht die Leitfähigkeit von Edelstahl. Eine punktuelle, heftige Entladung ist auch bei stark beschichteten Schutzhülsen nicht aufgetreten. Für Schichten im Sinne des Projektes wurde somit eine dauerhaft prozessstabile Lösung für die Isolatoren gefunden, insbesondere für kleine Horizontalboote, bei denen sich eine geringe Anzahl Isolatoren schnell und einfach tauschen lässt und die Schutzhülsen außer zum Tausch nicht bewegt werden.

Im Projektmonat 31-36

Für die lokale PECVD-Abscheidung mittels Masken wurde nochmal eine weitere Bootgeneration entwickelt, siehe auch Abbildung 18. Auf die Anlegepins für Glasmasken und Auflagepins für Wafer wurden verzichtet. Es ist voraussichtlich nicht erforderlich, größere Glasmasken mit Zusatzaufwand zur Positionierung zu planen. Es ist ausreichend, wenn Wafer und Maske gleich groß sind und in einer gemeinsamen Vertiefung (auch Tasche genannt) Platz finden. Die Ungenauigkeit der Position, wenn Wafer und Maske übereinander in einen gemeinsamen Ausschnitt in der Bootplatte gelegt werden, kann sehr gut mit Justierkreuzen in der Maske kompensiert werden (Abbildung 15).

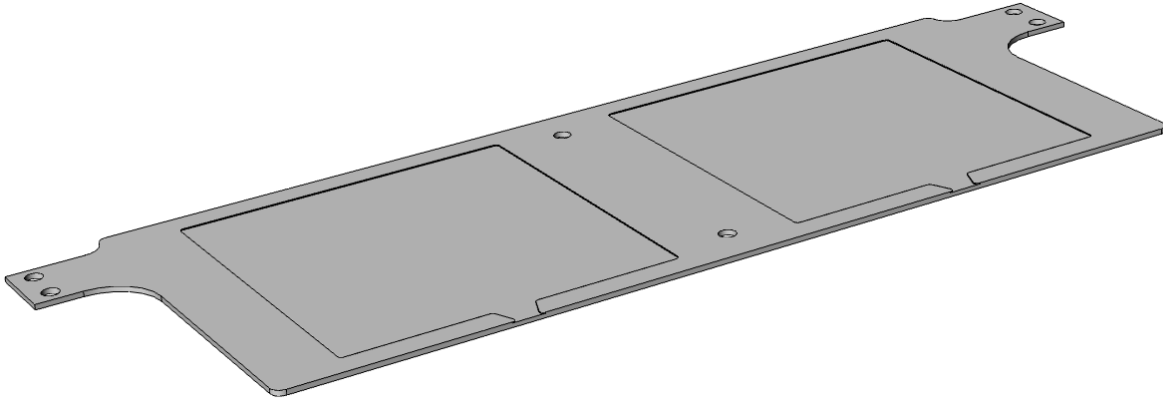


Abbildung 18: neu entwickelte Bootplatte für ein kleines Horizontalboot aufgrund neuester Erkenntnisse. Es gibt weder Haltepins für Masken noch für Wafer, da sie zu Verbiegungen der Wafer führen können. Um die Masken einfacher zu greifen, haben die Taschen eine kleine seitliche Öffnung. Aufgrund der E-Feld Berechnungen aus dem letzten Bericht wurden die Taschen nur 0.5 mm tief ausgeführt, um die Abscheidung am Waferrand nicht zu stören.

Es wurden insgesamt drei kleine Versuchsboote mit Ausführung der Bootplatten gemäß Abbildung 18 beschafft. Die weiteren Abscheideversuche mit Masken wurden teilweise mit diesen neuen Horizontalbooten durchgeführt. Das Ziel, eine größere Anzahl Wafer mit hoher Qualität von Beschichtung und Position der Kontakte zu prozessieren wurde erreicht, und es wurde ein Konferenzbeitrag vorbereitet¹⁰.

Die Weiterentwicklung der Isolatoren wurde in das Projekt Kobra (FKZ 03EE1106A) verlegt. Für Schichten im Sinne des Projektes TOPCon Cluster ist eine ausreichend prozessstabile Lösung für die Isolatoren gefunden.

Im Projektmonat 37-42

Wurden abschließende Arbeiten ausgeführt. Dabei wurde auch der mögliche Nutzen alternativer Plasmageneratoren bewertet, die Schichten im Sinn des Projekts eventuell stabiler erzeugen können als bisher. Ein wichtiger Punkt dabei sind Signalform und Frequenz der Anregung. Aufgrund der hohen erforderlichen Leistungen sind das typischerweise Geräte mit niederohmigen MOSFET-Ausgangsstufen, die auch bis zu wenige hundert kHz Rechtecksignale ausgeben können. Bei einem kleinen Horizontalboot und 40 kHz Betrieb ergibt sich typischerweise das Verhalten wie in Abbildung 19. Zu Beginn der Rechteckpulse kann es Spannungs- und Stromspitzen geben, die mikroskopische Kurzschlüsse auslösen können.

¹⁰ Study of Different Interfacial Oxides for Industrial N-Polysilicon Passivation on Polo-IBC Solar Cells V. Mertens, S. Dorn, J. Langlois, M. Stöhr, Y. Larionova, R. Brendel & T. Dullweber (ISFH, Emmerthal, Germany; N. Ambrosius (LPKF Laser & Electronics, Garbsen, Germany); T. Pernau & H. Haverkamp (centrotherm international, Blaubeuren, Germany), Konferenzbeitrag zur 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

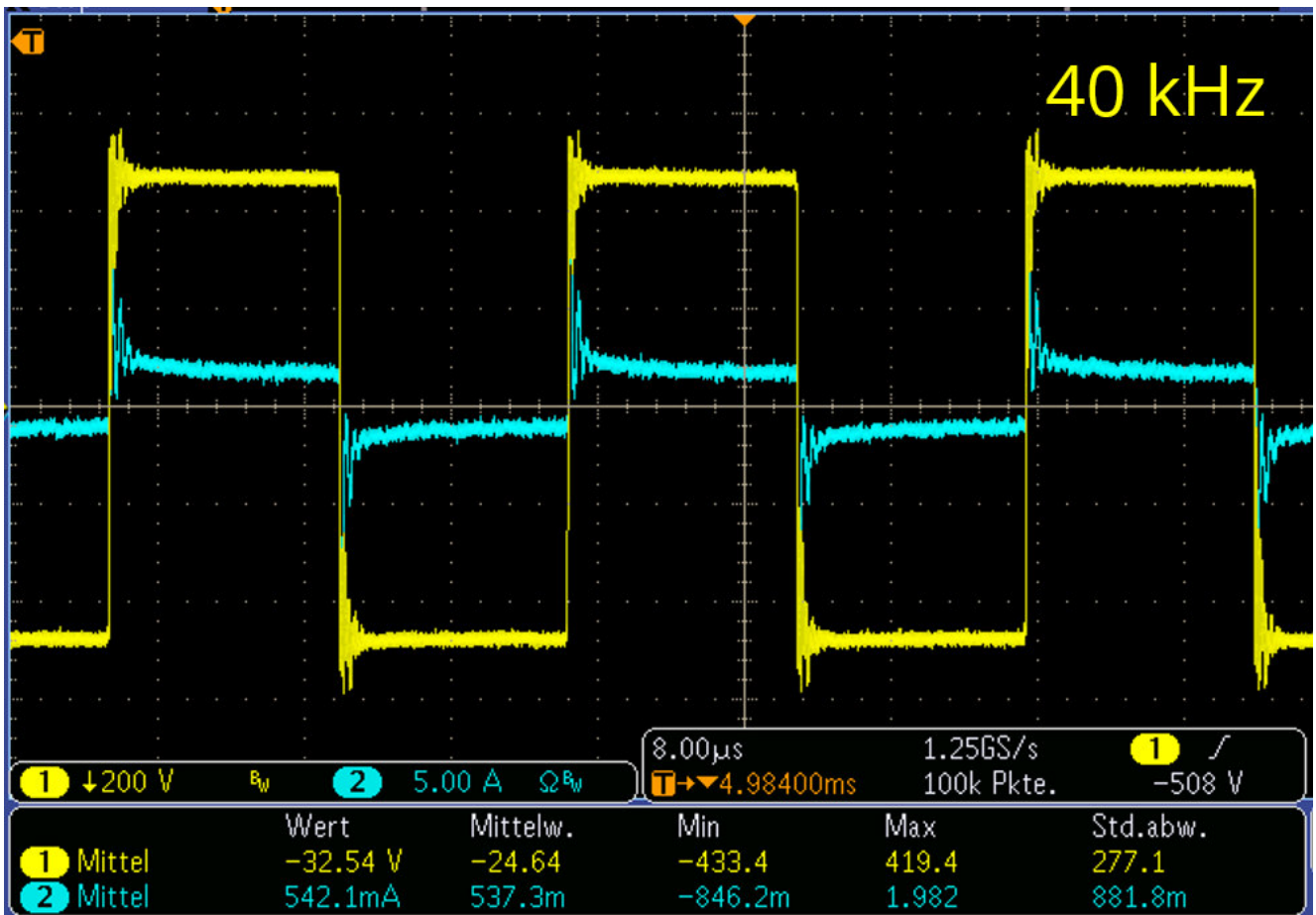


Abbildung 19, Spannung (gelb) und Strom (türkis) an einem kleinen Horizontalboot, das mit 40 kHz betrieben wird.

Diese sind nicht gewollt und erzeugen kleine Blitze zwischen den Platten, arcs genannt. Arcs können mit Gegenmaßnahmen unterdrückt werden, indem der Plasmagenerator die Leistungsabgabe aussetzt. Der Blitz wird kleiner und etwas weniger schädlich, aber nicht unterdrückt. Ein möglicher Schaden durch die kurzzeitig zu hohe Anfangsspannung bleibt. Bei höherer Betriebsfrequenz und großen Booten ist das Verhalten deutlich besser, die Spannungsspitzen unterbleiben weitestgehend (Abbildung 20). Das Risiko einer schädlichen Überspannung und übermäßiges Auftreten von arcs ist deutlich reduziert. Die hohe Frequenz ermöglicht bisher nicht nutzbare Kombinationen der Prozesseinstellung, z.B. eine Erhöhung der Arbeitstemperatur für PECVD a-Si Abscheidungen. Es wurden unter anderem Abscheidungen mit 550°C Betriebstemperatur durchgeführt, 100 K heißer als bisherige Standardprozesse. Das ermöglicht neue Anwendungsfelder, wie LPCVD-ähnliche PECVD-Prozesse mit höherem Anteil an kristallinem Silizium und besserer Aktivierung der Dotierstoffe. Es kam ein Prototyp eines Plasmagenerators zum Einsatz, der noch nicht kommerziell verfügbar ist. Das Gerät wurde bis 500 kHz getestet und war bis 320 kHz nutzbar (ab 400 kHz Spannungseinbruch und Überhitzung). Nach Ablauf des Projekts war ein 450 kHz Gerät für große Boote verfügbar. Prozesssimulationen für a-Si Abscheidungen haben ergeben, dass man große Boote bis etwa 2 MHz Anregungsfrequenz benutzen kann, kleine Boote sogar noch höher. Ein Test mit 5 MHz und kleinem Boot war erfolgreich, es konnten Brennspannungen < 60 Volt erreicht werden. Bei 40 kHz und vergleichbarer Abscheiderate sind es über 300V. Die

bisher oft erwähnten Plasmaschäden bei Anwendung von direkt-Plasma Anlagen können in Zukunft sicher überwunden werden.

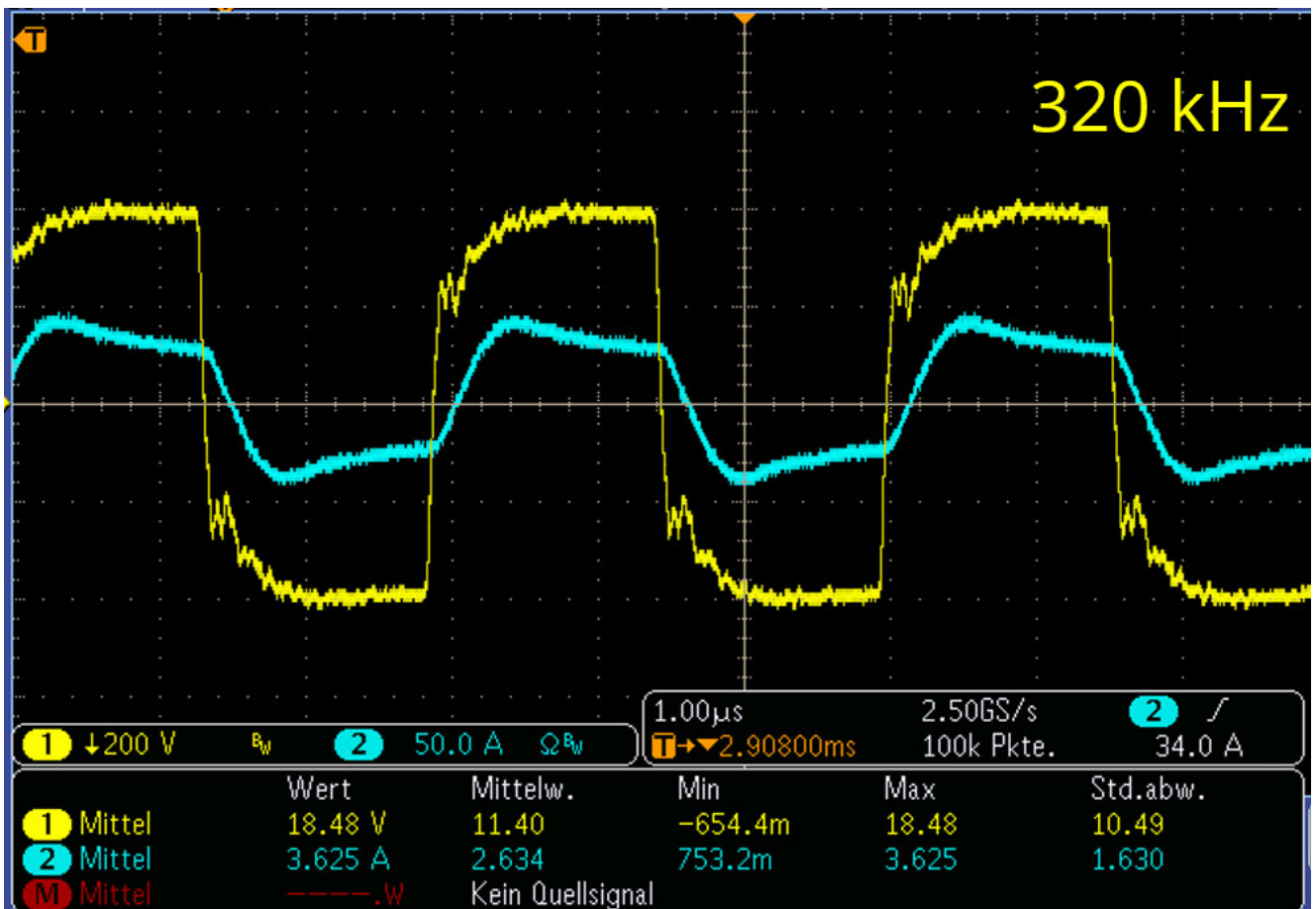


Abbildung 20: 320 kHz Betrieb eines großen Vertikalbootes. Überspannungen und mögliche Funkenbildung sind deutlich reduziert.

2.1.4 Arbeitspaket 4 Einseitige Ätzprozesse

Da mittels optimierter PECVD Beschichtung eine streng einseitige Beschichtung erreicht werden kann, ist hier keine Arbeitsleistung von centrotherm nötig.

2.1.5 Arbeitspaket 5 Siebdruckmetallisierung

Der hauseigene centrotherm Feuerofen-Regenerator wurde bereit gehalten, aber nicht genutzt

2.1.6 Arbeitspaket 6 Galvanik-Metallisierung

Keine Aktivitäten in der gesamten Projektlaufzeit

2.1.7 Arbeitspaket 7 Basisprozess

Im Projektmonat 6-12

noch keine Aktivitäten im Berichtszeitraum

Im Projektmonat 13-18

Es wurde ein Basisprozess zur Abscheidung von a-Si Schichten in großen Horizontalbooten bereitgestellt. In diesen Booten kann eine Abscheiderate von 20 nm/min erreicht werden.

Im Projektmonat 19-24

Der Basisprozess wurde weiter gepflegt

Im Projektmonat 25-30

Der Basisprozess zur Abscheidung von a-Si Schichten in großen, industrieüblichen Booten wurde weiter gepflegt. Ein Prozessvorschlag für eine zukünftige Solarzellenproduktion wurde erarbeitet und einem Planungsbüro für Solarzellenproduktion vorgelegt.

Im Projektmonat 31-36

Geringe Korrekturen am Basisprozess

Im Projektmonat 37-42

Der Basisprozess ist festgelegt. Keine Änderungen mehr nötig. Es wurde eine industrielle Anlage zur Herstellung von Schichten im Sinne des Projekts definiert, siehe Abbildung 21. Die Anlage ist voraussichtlich zur Beschichtung von 5000 Wafern pro Stunde geeignet, Waferformat 182mm. Aufgrund der Größenbeschränkung im Labor wurden keine Wafer in dieser Größe getestet, es wurden aber Boote für 156mm Wafer bei vergleichbarer Plattenoberfläche verwendet. Aufgrund der zu beschichtenden Oberfläche kann eine ziemlich sichere Vorhersage abgegeben werden.



Abbildung 21: vorgeschlagene PECVD Anlage für Schichten im Sinne des Projekts: plasma XL a-Si, zur Beschichtung von 5000 Wafern pro Stunde (Wafergröße 182 mm)

2.1.8 Arbeitspaket 8 Kostenkalkulation

Im Projektmonat 1-6

Die zu erwartenden Betriebskosten von industriellen PECVD-Anlagen wurden ermittelt, für den Fall dass die Anlagen Schichten im Sinne des Projekts erzeugen. Durch den Wegfall des Prozessgases NH_3 gegenüber klassischen Anwendungen ergibt sich ein Vorteil in Kosten und Umweltbilanz der Anlage.

Im Projektmonat 7-12

Die zu erwartenden Betriebskosten von industriellen PECVD-Anlagen wurden fortgeschrieben, unter der Annahme, dass nun eine höhere Abscheiderate erreicht werden kann. Der Verbrauch an Prozessgasen hat sich nicht erhöht.

Im Projektmonat 13-18

Die vorherige Vermutung der höheren Abscheiderate wurde bestätigt. Der Verbrauch an Prozessgasen hat sich nicht erhöht, so dass sich die zu erwartenden Kosten für die a-Si Abscheidung weiter reduzieren.

Im Projektmonat 19-24

Keine Veränderung

Im Projektmonat 25-30

Die zu erwartenden Betriebskosten von industriellen PECVD-Anlagen wurden fortgeschrieben, unter der Annahme, dass eine für Parallelplatten-PECVD übliche Abscheiderate und Bootgröße erreicht werden kann. Es wurde der absehbare Verbrauch für eine zukünftige Solarzellenproduktion ermittelt.

Im Projektmonat 31-36

Geringe Korrekturen durch den Basisprozess

Im Projektmonat 37-42

Die zu erwartenden Betriebskosten für industrielle PECVD-Anlagen im Sinne des Projekts wurden festgelegt. Mehrere Industriekunden wurden informiert, um eine zukünftige Solarzellenherstellung zu planen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

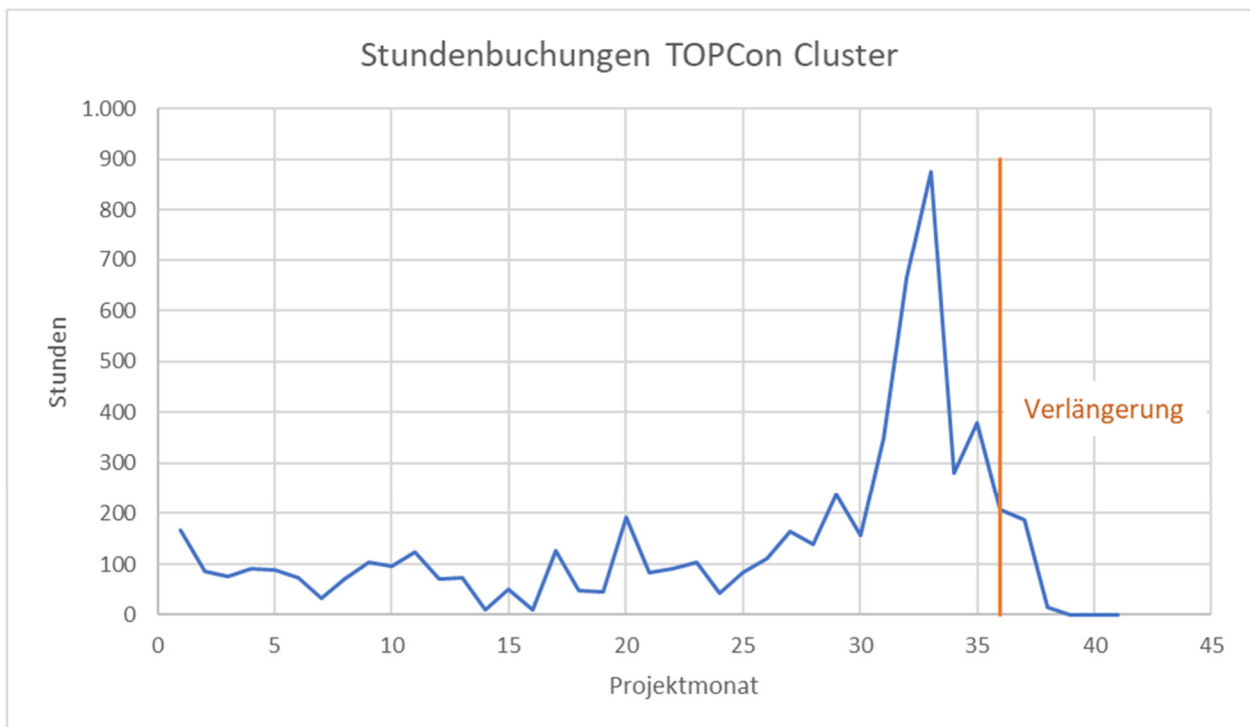
2.2.1 Material und Verbrauchsmittel

Die geplanten Kosten wurden um 24% überschritten. Es gab einen Mehraufwand bei den Dotiergasen und es mussten mehr Testmuster von Isolatoren beschafft und getestet werden als geplant.

2.2.2 F&E Fremdleistungen, sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

2.2.3 Vorhabenbezogene Stunden

Es wurden 95% mehr Stunden geleistet als beantragt. Die Leistung erfolgte vor allem zum Ende des Projekts, um eine industrielle Produktionsanlage im Sinne des Projekts zu entwickeln.



Das Projekt hatte eine kostenneutrale Verlängerung (orange Linie), hauptsächlich um Arbeiten bei den Projektpartnern nachzuholen. Bei centrotherm waren nur geringe Nacharbeiten erforderlich.

2.2.4 Reisekosten

2.2.5 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Es ergab sich eine kleine Kosteneinsparung gegenüber dem Antrag (1%)

2.2.6 Investitionskosten und Abschreibungen

Es wurden keine Großgeräte o.ä. angeschafft sondern bestehende Geräte aus dem Anlagenpark der Fa. centrotherm genutzt. Für die Nutzung der Großgeräte wurden keine Abschreibungskosten angesetzt, da die Geräte nicht ausschließlich vorhabenbezogen verwendet wurden sondern auch für hauseigene Experimente und Demonstrationen.

2.3 Notwendigkeit der Zuwendung

Das vorliegende Projekt bezieht sich auf den Förderschwerpunkt „F&E für Photovoltaik“ des BMU und des BMBF. Die im Rahmen des Verbundvorhabens anvisierten Ziele entsprechen dem Anspruch, einen selbsttragenden PV-Markt basierend auf speicherunterstützten PV-Systemen mit erhöhten Eigenverbrauchsanteilen in Deutschland zu realisieren und die Energieerzeugung mit klima- und umweltverträglichen Technologien langfristig wettbewerbsfähig zu gestalten.

Bei der komplexen Technologieentwicklung von qualitativ hochwertigen und langlebigen Hocheffizienzzellen besteht das wirtschaftliche Risiko, dass nur wenige Prozesse und Technologien den anspruchsvollen Zielkorridor von Produkt-Performance und Produkt-Kosten treffen werden. Der erhöhte Forschungsaufwand in Breite und Tiefe und das damit verbundene Entwicklungsrisiko machen die Unterstützung durch öffentlich geförderte Verbundprojekte notwendig. Weiterhin zeigt die Einbeziehung führender Forschungsinstitute, Hochschulen und Universitäten sowie die Integration lokaler KMU's im Rahmen des Verbundprojekts, dass der Forschungsumfang von der centrotherm AG alleine nicht zu schultern war. Um einen verlässlichen Beitrag zum weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien mit wettbewerbsfähigen Stromherstellkosten leisten zu können, war die staatliche Förderung gerechtfertigt.

Ohne eine Förderung hätten die Themen bei der augenblicklichen wirtschaftlichen Situation von centrotherm aufgrund der vorhandenen Entwicklungsrisiken und des damit einhergehenden wirtschaftlichen Risikos nicht in dem wie in diesem Bericht belegten notwendigen Umfang behandelt werden können. Insbesondere wäre centrotherm nicht in der Lage gewesen, die direkt-Plasma Technologie zur a-Si-Abscheidung ohne die Hilfe der Projektpartner umzusetzen. Die Expertise der Projektpartner zu Beginn des Projekts hat den richtigen Weg gezeigt, die Unterstützung während der Laufzeit des Projekts hat entscheidend zum Gelingen und zum eigenen Wissensaufbau beigetragen. Nur mit diesem Wissen konnten auch die technologischen Schwierigkeiten in der letzten Phase des Projekts gemeistert werden. Letztendlich wurde nur im Rahmen eines geförderten Verbundprojekts unter Einbeziehung von Forschungseinrichtungen und einer Abdeckung der gesamten relevanten Wertschöpfungskette durch die Verbundpartner zeitnah eine technologisch abgesicherte und wirtschaftliche Einführung der entwickelten Technologien und Prozesse möglich.

Dies kommt in erster Linie den beteiligten Verbundpartnern in Deutschland zugute, die sich damit einen zeitlichen Vorsprung für den nächsten Innovationsschritt bei der industriellen Einführung von TOPCon Solarzellen erarbeitet haben.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Der Nutzen und die Verwertbarkeit der 40 kHz direkt-Plasma a-Si Technologie steht unmittelbar bevor. Es wurden bereits Laboranlagen bei Kunden im Sinne des Projekts neu beschafft bzw. nachgerüstet. Die ersten Produktionsanlagen im Sinne des Projekts gehen voraussichtlich im Herbst 2024 in Produktion.

2.5 F&E Erkenntnisse von dritter Seite, die für das Vorhaben relevant sind

Es gab eine Veröffentlichung zu Tunneloxiden, die mit einem Ozongenerator erzeugt wurden¹¹, die Anwendbarkeit in der Kombination mit klassischen PECVD-Abscheidungen wurde geprüft. Die Methode wurde als zu teuer und zu aufwändig in der Kombination mit klassischen PECVD-Anlagen eingestuft und nicht weiter verfolgt.

Die Entwicklung der Isolatoren wurde auf das Kobra-Projekt (FKZ 03EE1106A) übertragen und es ist daraus ein verbesserter Isolator verfügbar.

2.6 Liste der Veröffentlichungen

¹¹ Liu et al., 24.4% industrial tunnel oxide passivated contact solar cells with ozone-gas oxidation Nano SiO_x and tube PECVD prepared in-situ doped polysilicon ,<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111803>

3. Auszug-Zusammenfassung des nicht-öffentlicher Teils

3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den Förderpolitischen Zielen

Das Verbundvorhaben „TOPCon Cluster“ bezieht sich auf die Bekanntmachung BAnz AT 21.05.2013B3¹² des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung des Themenfelds F&E für Photovoltaik.

3.1.1 Zuwendungszweck

Die centrotherm international AG ist der Ansicht dass ihre Tätigkeit im Verbundprojekt „TOPCon Cluster“ den vom Fördergeber genannten Zuwendungszweck erfüllt, siehe unterstrichene Textpassagen des Zitats aus dem Bundesanzeiger: „Neben produktionsnahen Innovationen in der PV-Modultechnik und dem PV-Anlagenbau sollen vor allem komplexe systemtechnische Ansätze und PV-Systemlösungen adressiert werden, um Geschäftsmodelle mit Wertschöpfungsketten am Standort Deutschland im Verbund von Industrie und industrienahen Dienstleistungen voranzutreiben.“¹²

centrotherm Anlagen sind im Vergleich zu preisgünstigen asiatischen Alternativprodukten komplex, aber auch sicherer, effizienter und zuverlässiger. Eine centrotherm Anlage kann nur noch verkauft werden indem sie innovativer ist als günstigere Konkurrenzprodukte.

3.1.2 Gegenstand der Förderung

Folgende vom Fördergeber genannten thematischen Schwerpunkte wurden behandelt:

- Produktionsverfahren und Automatisierungskonzepte für Hocheffizienz- bzw. Qualitätsmodule; innovative Anlagentechnik für integrierte Fertigungslösungen
- Neue Handling-Verfahren und Prozess-Equipment zur Erhöhung der Durchsatzraten einschließlich Inline-fähiger Prozessüberwachung und Analytik zur frühzeitigen Fehlererkennung
- Nutzbarmachung neuer Materialien und Prozesse zur Ertragssteigerung (z. B. bessere Einkopplung oder Ausnutzung des Sonnenspektrums)
- Arbeiten zur Nachhaltigkeit des Ressourceneinsatzes (z. B. Energieeinsparungen im Herstellungsprozess, Vermeidung des Einsatzes schädlicher oder knapper Rohstoffe)

Die centrotherm international AG ist der Ansicht dass ihre Tätigkeit in den o.g. Teilbereichen der Idee des Fördergebers nachkommt, „die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Photovoltaik-Branche mittel- und langfristig zu sichern und auszubauen“.

¹² https://www.bundesanzeiger.de/ebanzwww/wexsservlet?page.navid=official_starttoofficial_view_publication&session.sessionid=b87d7d079aeeabd476db9b9dd4d36fe9&fts_search_list.selected=ab62440703c9dbae&&fts_search_list.destHistoryId=43934&fundstelle=BAnz_AT_21.05.2013_B3

3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Siehe dazu den öffentlichen Teil des Abschlussberichts, Abschnitt 2.

3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3.3.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen

.

3.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

centrotherm erwartet, dass in 2024 die Technologiewende zu Solarzellen im Sinne des Projekts vollzogen wird, zumindest bei den Neuinstallationen. Die erwartete technologische Lebensdauer von Solarzellen im Sinne des Projekts sind 10 Jahre, d.h. bis ca. 2034 ist mit Neu- oder Ersatzbeschaffungen von Anlage im Sinne des Projekts zu rechnen.

3.3.3 Technisch-wissenschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Mit der Technologie im Sinne des Projekts ist technisch das Wirkungsgradmaximum einer single junction Siliziumsolarzelle erreicht. Egal, ob in Zukunft Einzelschicht-, Tandem- oder Multischicht-Solarzellen eingeführt werden, die beidseitig TOPCon-beschichtete Basiszelle wird aufgrund der maximal möglichen Effizienz beibehalten. Die technisch-wissenschaftlichen Erfolgsaussichten ähnlich gut wie für die Siebdruck-BSF Zellen, die ebenfalls sehr lange Basistechnologie waren.

3.3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

centrotherm wird durch die erfolgreiche Teilnahme in einem F&E Projekt über eine längere Zeit als kompetenter Forschungspartner und technologisch führendes Unternehmen wahrgenommen.

3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

- Tunneloxide mittels Ozongenerator
- Schutzhülsen / Schutzringe um Isolatoren
- Detaillösungen der Dotiergasinstallation

Diese Inhalte sind nicht verloren, müssen aber in einer Neuauflage der Technologie anders gelöst werden.

3.5 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

3.5.1 Kostenplan

Die geplanten Kosten wurden um 88% überschritten. centrotherm hat das in Kauf genommen, um die Konstruktion einer industriellen PECVD-Anlage im Sinne des Projekts zu vollenden.

3.5.2 Zeitplan (Meilensteine)

Mit Hilfe des ISE konnte centrotherm den Meilenstein 3.4 erfüllen: „Prozess für einseitige PECVD-Abscheidung entwickelt, Stromfluss $< 2 \text{ mA/cm}^2$ bei Rückwärtsbelastung der Zellen mit 12V“. Schichten in dieser Qualität können im centrotherm-Labor nicht erreicht werden, da die Wafer nicht direkt vor der PECVD-Abscheidung gereinigt werden können.

3.5.3 Zeitplan (Projektstunden)

Geplant war eine ungefähr gleichmäßige Arbeitsleistung von 90 Monatsstunden. Dies wurde auch bis in den Monat 30 ungefähr eingehalten.

Im Monat 30 wurde entschieden, eine Produktionsanlage im centrotherm Labor zu modifizieren, um Schichten im Sinne des Projekts großtechnisch herzustellen. Im Wesentlichen wurde das bisher erarbeitete Wissen auf eine größere Anlage übertragen, mit größeren Booten, größerer Prozesskammer und für größere Wafer. Dadurch entstand ein Mehrbedarf.