

Emitterverbund- Rückkontaktsolarzellen für die industrielle Fertigung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
des Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)
an der Universität Konstanz
Fachbereich Physik

vorgelegt im Mai 2001 von

Andreas Kreß

Tag der mündlichen Prüfung: 16.10.2001
1. Referent: Prof. Dr. E. Bucher, Universität Konstanz
2. Referent: Prof. Dr. W. Wettling, Fhg ISE Freiburg

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
1. Kapitel - Rückkontaktsolarzellen	7
1.1 Überblick	7
1.2 Konventionelle Solarzellen	8
1.3 Rückkontaktzellen	9
1.3.1 Hocheffizienz-Rückkontaktzelle	9
1.3.2 Emitter-Wrap-Through-Zellen	10
1.3.3 Metallisation-Wrap-Around-Zellen	12
1.3.4 Metallisation-Wrap-Through-Zellen.....	13
1.4 Zusammenfassung	14
2. Kapitel - Prozesstechnik	17
2.1 Einführung.....	17
2.2 Erzeugen der Löcher	19
2.2.1 Mechanische Strukturierung (Wafersäge)	19
2.2.2 Laser	21
2.3 Rückseitendefinition, Trennung von p- und n ⁺ -Bereich.....	23
2.3.1 Lokales Entfernen dünner Schichten	24
2.3.2 Diffusionsbarrieren	27
2.3.3 Weitere Methoden zur lokalen p- und n ⁺ - Definition	30
2.4 Siebdrucktechnik	31
2.5 Metallisierungspasten.....	32
2.6 Emitterdiffusion	34
2.6.1 Gasphasendiffusion.....	34
2.6.2 Pasten zur Emitterdiffusion.....	35
2.6.3 Feststoffdiffusion	35
2.6.4 Zwei-Stufen-Emitter	35
2.7 Antireflexschicht und Fronttextur.....	36
2.7.1 Antireflexschicht.....	37
2.7.2 Alkalische Texturierung.....	37
2.7.3 Mechanische Texturierung	38
3. Kapitel - Charakterisierung von EWT-Zellen	39
3.1 IV-Messung	39
3.2 Interne Quantenausbeute	41
3.3 LBIC Messungen.....	44
3.4 Thermographie	45
4. Kapitel - Prozeßevaluierung	46
4.1 Vergleich von Laser und Säge zur Locherstellung	46
4.2 Definition des p- und n-Bereichs der Zellrückseite	48
4.2.1 Mechanisches Emitterabfräsen	48
4.2.2 Selbstjustierendes Plasmaätzen.....	49
4.2.3 Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid.....	51
4.2.4 Siebgedruckte Diffusionsbarriere	54
4.2.5 Zusammenfassung zur pn-Bereichsdefinition.....	55

4.3	Emitterdiffusion	56
4.3.1	Diffusion mittels Siebdruck P-Paste	56
4.3.2	Gasphasendiffusion.....	56
4.3.3	Zwei-Stufen-Emitter	57
4.4	Finger- und Lochabstände	58
4.4.1	Gridgeometrie	59
4.4.2	Fingerabstand und Serienwiderstand, Breite der Busbars	61
4.4.3	Anzahl der Verbindungslöcher	63
4.5	Basismetallisierungspaste, Frontseitentexturierung	63
4.5.1	Vergleich von Al und Al/Ag Paste für den Basiskontakt	63
4.5.2	Frontseitentexturierung	67
4.6	Multikristallines Silizium.....	67
4.6.1	Mechanisch texturierte EWT-Zellen für ein Minimodul.....	68
4.6.2	Untersuchungen zur Wasserstoffpassivierung.....	69
4.7	Erfolgreichster Prozeß.....	72
5.	Kapitel - Wirkungsgradoptimierung.....	75
5.1	Einfluß des Rückseitenemitters auf die Leerlaufspannung.....	75
5.1.1	Modell des unbeleuchteten Rückseitenemitters.....	75
5.1.2	Zwei-Dioden-Modell, Sättigungsstrom J_{01}	78
5.1.3	Rekombination am pn-Übergang, Sättigungsstrom J_{02}	80
5.1.4	Zusammenfassung.....	83
5.2	Parallel- und Serienwiderstand	83
5.2.1	Kontakt- und Linienwiderstandsbestimmung der Metallisierungspasten.....	83
5.2.2	Weitere Beiträge zum Serienwiderstand.....	84
5.2.3	Shuntwiderstand.....	86
5.2.4	Auswirkungen auf den Füllfaktor	89
5.3	Vergleich mit konventionellen Solarzellen.....	89
5.3.1	Stromgewinn durch das EWT-Konzept	89
5.3.2	Verringerte offene Klemmenspannung.....	91
5.3.3	Wirkungsgrad im Vergleich.....	92
5.4	Optimierung von EWT-Zellen	93
5.4.1	Vorbemerkung	93
5.4.2	Emitterschichtwiderstand.....	94
5.4.3	Optimaler Fingerabstand.....	95
5.4.4	Basisdotierung.....	96
5.4.5	Passivierung der Basisoberfläche	97
5.4.6	Basis und Emitteranteil auf der Rückseite.....	99
5.5	Wirkungsgradpotential von EWT-Zellen.....	100
5.6	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen.....	101
5.7	Schlußfolgerung	102
6.	Kapitel - Modulverschaltung.....	104
6.1	Verbindung von Substrat und Zelle	104
6.2	Einfluß der Verglasung auf den Wirkungsgrad.....	105
6.3	Mögliche Substrate.....	105
6.4	Minimodule	107
6.5	Zusammenfassung	109
	Zusammenfassung.....	110
	Literaturverzeichnis.....	118
	Publikationen.....	127

Einleitung

Der heutige Energieverbrauch deckt sich zum größten Teil aus fossilen Brennstoffen, den in Jahrmillionen gespeicherten Vorräten an Sonnenenergie. Ein weiterer großer Anteil wird durch Kernenergie gedeckt, deren strahlende Abfallprodukte für künftige Jahrtausende die Menschheit gefährden werden. Diese kurzsichtige und auf Kredit angelegte Energiegewinnung muß allmählich durch die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen ersetzt werden [1].

Eine Möglichkeit, die kostenlos zur Verfügung stehende Energie der Sonne unmittelbar zu nutzen, ist die Verwendung von Solarzellen. Solarzellen wandeln Sonnenlicht direkt in elektrische Energie um. Elektrische Energie ist die wertvollste Energie überhaupt, da sie sich mit geringen Verlusten transportieren und in andere Energieformen umwandeln läßt.

Jedoch ist Solarstrom trotz aller Entwicklungsfortschritte immer noch ein Luxusgut, weil er im Vergleich mit dem Kraftwerksmix aus fossiler Energie und Kernenergie deutlich teurer ist. Vor allem die hohen Investitionskosten für Photovoltaik-einrichtungen schrecken viele potentielle Anwender ab; die verschwindend geringen Betriebskosten von Photovoltaik-anlagen wirken dagegen beim derzeit niedrigen Preisniveau für Kraftwerksstrom kaum als Anreiz. Die Effizienz von Solarzellen, d. h. das Verhältnis der produzierten elektrischen Energie zur eingestrahlten Sonnenenergie, ist bei Verwendung von Siliziumsolarzellen theoretisch auf etwa 30 % begrenzt [2]. Der höchste auf einer Forschungssolarzelle erreichte Wirkungsgrad beträgt etwa 25 % [3]. Industriell in Großserien hergestellte Solarzellen erreichen heute zwischen 14 % und 16 % Wirkungsgrad [4] und sind damit an einem Optimum zwischen Herstellungskosten und Wirkungsgrad angelangt.

Die Kosten für ein Photovoltaikmodul teilen sich etwa zu gleichen Teilen auf zwischen Waferproduktion, Zellherstellung und der Verschaltung der Zellen zum Modul [5]. Nachdem bei der Herstellung der Solarzelle aus dem Wafer wenig Spielraum für Kostensenkungen gegeben ist, zielen neue Entwicklungen darauf ab, die Modulkosten durch einfachere Verschaltung der Zellen zu senken. Eine weitere Möglichkeit, die Kosten für Photovoltaikanlagen zu reduzieren, besteht darin, die Solarzellen in Gebäudefassaden zu integrieren und auf eigene – optisch oft wenig attraktive und teure – Aufständierungen zu verzichten. Im Fassadenbau sind die Ansprüche an den optischen Eindruck von Solarzellen jedoch höher, weshalb vielfach nach Möglichkeiten gesucht wird, die Solarzellenvorderseite durch z. B. Schwärzen der hellen Kontakte homogener zu gestalten.

Rückkontaktsolarzellen, bei denen beide Kontaktgrids auf der Rückseite liegen bieten hier große Vorteile: Die Zellvorderseite sieht einheitlich homogen aus. Die Distanz zwischen einzelnen Zellen kann sehr gering sein, da Vorder- und Rückseiten nicht durch die üblichen verzinnnten Kupferbänder verbunden werden müssen. Außerdem wird die Verschaltung einzelner Zellen zum Modul durch in der Modulrückseite eingebettete Leitungssysteme deutlich vereinfacht.

Die Entwicklung dieser Rückkontaktzellen wird weltweit mit großem Nachdruck verfolgt. Wirtschaftlich sinnvoll ist die Verwendung von Rückkontaktzellen jedoch nur dann, wenn sie großindustriell und kostengünstig hergestellt werden können. Diese Herausforderung wird in der vorliegenden Arbeit mit der Entwicklung eines industrietauglichen Prozesses zur Herstellung von Rückkontaktsolarzellen angenommen. Dabei ist die Arbeit folgendermaßen aufgebaut:

Im ersten Kapitel werden verschiedene Arten von Rückkontaktsolarzellen verglichen. Im Gegensatz zu den Hocheffizienz-Rückkontaktzellen sind bei Emittterverbundzellen der Frontemitter und der rückseitige Emitterkontakt elektrisch verbunden, um kostengünstige Siliziumwafer mit moderater Diffusionslänge verwenden zu können. Im Emitter-Wrap-Through (EWT)-Konzept [6-10] wird der Frontemitter durch zahlreiche kleine Löcher mit dem Emitterkontakt auf der Rückseite verbunden. Wegen der kontakt- und auch abschattungsfreien Vorderseite erscheint daher die Entwicklung von EWT Zellen am attraktivsten. Für die Metallisierung wird mit der Siebdrucktechnik ein industriell etabliertes, einfaches und zuverlässiges Verfahren für die elektrische Kontaktierung von Solarzellen gewählt.

Im zweiten Kapitel wird eine Auswahl verschiedener Prozeßtechniken erläutert, die für die EWT-Zellenherstellung in Frage kommen. Eine der Schlüsselstellen im Prozeß ist die elektrische Trennung von p- und n-leitenden Bereichen auf der Zellrückseite. Für diese pn-Bereichsdefinition werden mehrere Verfahren untersucht. Alle bisher bekannten Methoden, mit denen diese Trennung erfolgreich durchzuführen ist, beruhen auf Photolithographie-techniken und sind daher für die industrielle Fertigung ungeeignet. Folglich müssen neue Verfahren entwickelt werden.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit den zum Vergleich der verschiedenen Herstellungsverfahren notwendigen Charakterisierungsmethoden.

Im vierten Kapitel werden verschiedene industrietaugliche Prozeßsequenzen auf ihre Eignung untersucht, hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Als Anhaltspunkt gilt dabei die Anforderung des EU-Projekts „ACE Designs“ – in dessen Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde – von damals erreichbaren 10 % in den Bereich von 16 % vorzustoßen. Spezielle Aufmerksamkeit wird hier der Emitterdiffusion und der Kontaktgeometrie gewidmet.

Teilweise durch Computersimulationen unterstützt, wird im fünften Kapitel versucht, Beschränkungen, die durch ungenügend angepaßte Prozeßbedingungen entstehen, von konzeptbedingten Effekten zu unterscheiden. Das Ergebnis ist eine Abschätzung des Potentials von kostengünstigen EWT-Solarzellen innerhalb der technologischen und physikalischen Grenzen. Hier geht es speziell um die Frage, wie sich der zusätzliche Rückseitenemitter auf Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom der Solarzelle auswirkt, und welches Wirkungsgradpotential mit EWT-Zellen erreicht werden kann.

Im sechsten Kapitel werden schließlich Möglichkeiten zur Verschaltung von EWT-Zellen zu Modulen diskutiert: Da Rückkontaktsolarzellen vor allem die Modulverschaltung vereinfachen sollen, muß ihre Herstellung in enger Verbindung mit der Modulherstellung betrachtet werden. So werden hier auch abschließend zwei Minimodule aus jeweils vier EWT-Zellen präsentiert.

1. Kapitel - Rückkontaktsolarzellen

1.1 Überblick

Anders als bei konventionellen Solarzellen, die einen Front- und einen Rückkontakt tragen, sind bei Rückkontaktsolarzellen beide externen Kontakte auf der Rückseite der Zelle angeordnet. Daraus ergeben sich unter anderem Vorteile bei der Modulverschaltung [5], die Abschattungsverluste werden verringert und es eröffnet sich die Möglichkeit, Ladungsträger auch an der Rückseite einzusammeln [6]. Mehrere Varianten von Rückkontaktzellen (Fig. 1) sind schon länger Gegenstand der Solarzellenforschung [6-14]. In jüngerer Zeit vergrößerte sich das Interesse an industriell produzierbaren kostengünstigen Rückkontaktzellen, die dazu beitragen, Wirkungsgrad und Akzeptanz von Solarstrom zu steigern und die Kosten für Photovoltaikanlagen zu senken [8, 15, 16].

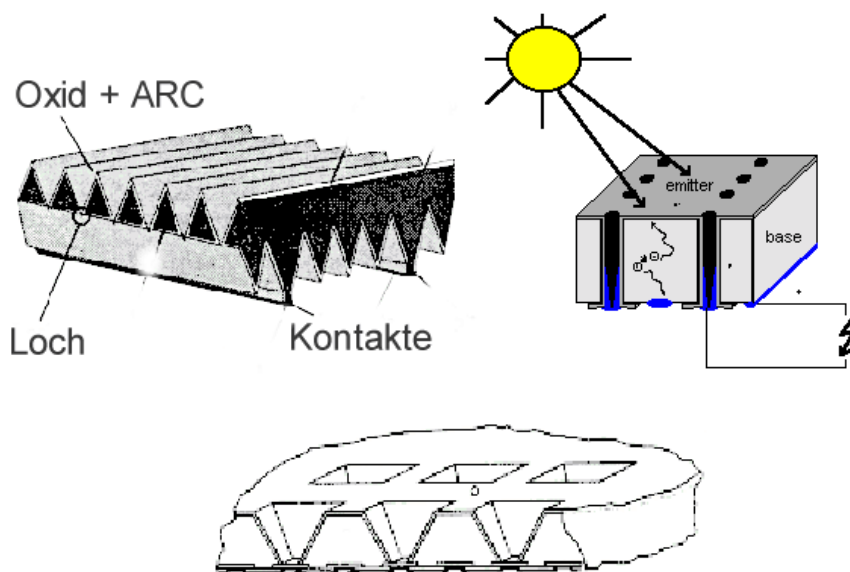


Fig. 1: Drei Beispiele von Rückkontaktzellen. Oben links eine POWER-Zelle [17], oben rechts eine EWT-Zelle [9] und unten eine Waffle-Zelle [10].

In diesem Kapitel werden zunächst vier Varianten von Rückkontaktsolarzellen vorgestellt und die Unterschiede zur konventionellen Zelle illustriert. Besondere Beachtung findet dabei das Emitter-Wrap-Through (EWT)-Konzept [6]. Abschließend wird in einem kurzen Überblick erläutert, welche Verfahren zur Herstellung von Rückkontaktzellen bisher veröffentlicht und welche Wirkungsgrade man dabei erreichte.

1.2 Konventionelle Solarzellen

Herkömmliche industriell produzierte Solarzellen bestehen aus einer Schichtstruktur, die fast ganz durch eine eindimensionale Beschreibung charakterisiert werden kann (Fig. 2). Der ca. 300 μm dicke Bor-dotierte Wafer ($\rho = 0,2 - 2 \Omega\text{cm}$) aus mono- oder multikristallinem Silizium bildet die p-leitende Basis. Durch Eindiffusion von Phosphor wird eine n-leitende dünne Schicht, der Emitter, an der Oberfläche erzeugt. Die Basis wird mittels einer ganzflächig aufgetragenen Aluminiumschicht kontaktiert, wobei sich beim Einlegieren des Aluminiums ($T_{\text{eutektik}} = 577 \text{ }^\circ\text{C}$) eine hochdotierte p-Schicht, das Back-Surface-Field (BSF), bildet. Das BSF wirkt für die im Volumen generierten Minoritätsträger wie ein Spiegel und verringert dadurch deren Rekombination am Basiskontakt [2]. Eine merkliche Steigerung des Kurzschlußstromes ergibt sich durch das BSF jedoch nur, wenn die Diffusionslänge der Minoritätsträger in der Basis die halbe Zelldicke übersteigt.

Der Emitter wird über schmale Finger kontaktiert, die untereinander durch einen oder mehrere Busbars verbunden sind. Da die metallischen Finger und Busbars keinen Lichteintritt in die Zelle erlauben, eine zu geringe Zahl und Breite von Fingern aber den Serienwiderstand erhöht, entsteht eine Optimierungsaufgabe, deren Lösung aus dem Minimum von elektrischen und Abschattungsverlusten besteht. Werden die Kontakte mittels Siebdrucktechnik hergestellt, kann der Schichtwiderstand des Emitters nicht beliebig hoch gewählt werden, da sich sonst die in der Paste enthaltene Glasfritte durch den Emitter hindurchfrißt und Kurzschlüsse verursacht [18, 19]. Die schmalsten Finger, die mit Siebdruck realisiert werden können, sind etwa 100 μm breit und 10 - 15 μm hoch. 6 - 10 % des auf die Zellvorderseite einfallenden Lichtes werden durch das Frontgrid (Finger und Busbar) abgeschattet. Über den Zellrand sind Frontemitter und Basiskontakt verbunden; dieser parasitäre pn-Übergang muß im Laufe des Prozesses getrennt werden. Dies kann durch mechanisches Sägen, mittels Laser oder auch Plasmaätzen erfolgen.

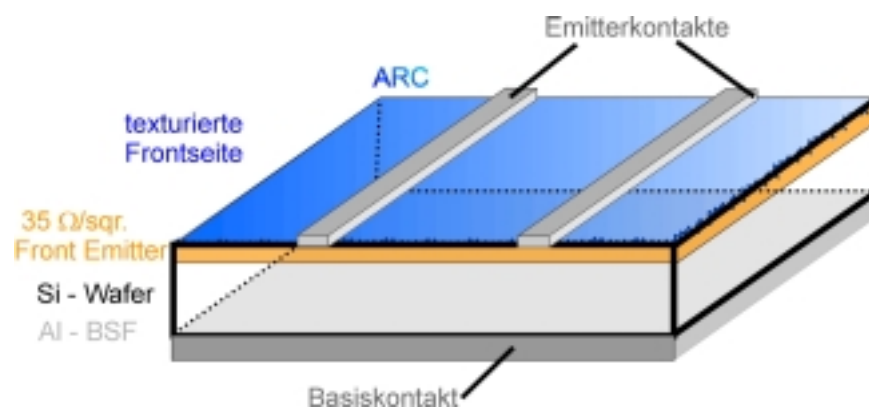


Fig. 2: Konventionelle Solarzelle: Emitterkontaktfinger auf der Frontseite, ganzflächige Metallisierung der Basis auf der Rückseite. Der hohe Al-Gehalt der Basismetallisierung erzeugt nach dem Feuern unter dem Kontakt ein Back-Surface-Field, das eine niedrige Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit ermöglicht. Das Frontgrid (Finger und Busbar) schattet 6 - 10 % des einfallenden Lichtes ab. Für die Verschaltung müssen jeweils Front- und Rückkontakt zweier benachbarter Zellen mittels Kupferstreifen verlötet werden.

Der Herstellungsprozeß für konventionelle Zellen ist vergleichsweise einfach. Da Emitterkontakt (Vorderseite) und Basiskontakt (Rückseite) räumlich getrennt sind, ist nur eine geringe Justiergenauigkeit beim Siebdruck erforderlich. Diese räumliche Trennung erschwert jedoch das Verschalten einzelner Zellen zum Modul: Front- und Rückkontakt zweier benachbarter Zellen müssen jeweils aufwendig mittels verzinnter Kupferstreifen verlötet werden.

1.3 Rückkontaktzellen

Um das Preis-Leistungsverhältnis von Solarzellen zu verbessern, wird auch nach neuen Zellkonzepten gesucht. Nachteile der herkömmlichen Zellen sind u. a. die Abschattung der Frontseite durch die Emitterkontakte, die komplizierte Verschaltung von jeweils Vorder- und Rückseite der Zellen im Modul und der dadurch bedingte Mindestabstand der einzelnen Zellen. Der Anteil der Verschaltungskosten beträgt immerhin 27 % an den Modulgesamtkosten [5].

Bei Emittverbund-Rückkontaktzellen (EWT, MWA, MWT) ist der Frontemitter mit dem auf der Rückseite liegenden Emitterkontakt elektrisch leitend verbunden. Anders als bei Hocheffizienz-Rückkontaktzellen kann daher auch Silizium mit moderater Diffusionslänge eingesetzt werden. Der Rückseitenemitter trägt sowohl bei rückseitiger Beleuchtung (Albedo-Strahlung [11, 20-24]) zur Wirkungsgradsteigerung bei, als auch durch Einsammeln von Ladungsträgern, die von langwelligen Photonen nahe der Rückseite generiert werden.

1.3.1 Hocheffizienz-Rückkontaktzelle

Beträgt die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger ein Vielfaches der Zelldicke, kann das gesamte Emittergitter ohne Verluste auf die Zellrückseite verlegt werden (Fig. 3), da auch Ladungsträger, die nahe der Frontseite generiert werden, den rückseitigen Emitter erreichen, ohne vorher zu rekombinieren [25]. Der oberflächenpassivierte Frontemitter wird nicht kontaktiert, er dient alleine der Verhinderung von Oberflächenrekombination (sog. Floating Junction) [26-28].

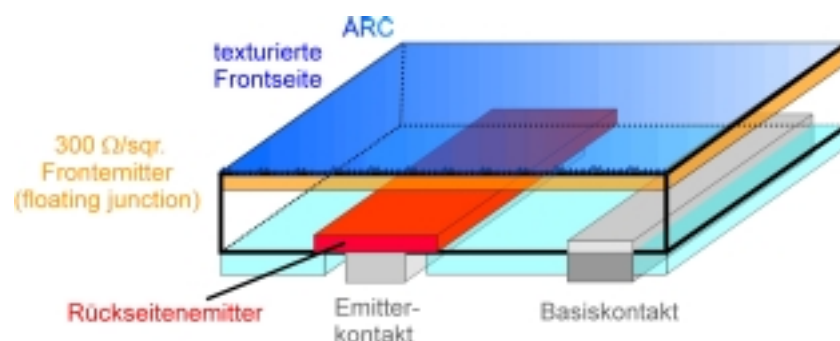


Fig. 3: Schema einer Hocheffizienz-Rückkontaktsolarzelle. Dieses Konzept ist nur bei Verwendung von hochwertigem Fz-Silizium realisierbar, bei dem die Diffusionslänge ein Mehrfaches der Zelldicke beträgt. Der oberflächenpassivierte Frontemitter (orange) gewährleistet geringe Oberflächenrekombination. Die beiden Kontaktgrids (grau) sind ineinander verschachtelt (interdigitated) auf der Zellrückseite angeordnet. Wegen des großen Flächenanteiles des rückseitigen Emitters (rot) eignet sich dieses Zellkonzept auch für bifaciale Zellen (Beleuchtung von Front- und Rückseite) [14].

Bei Zelldicken von 300 μm impliziert dieses Konzept allerdings den Einsatz von extrem teurem zonengereinigtem Floatzone-Silizium (Fz) und aufwendiger thermischer Oxidation für die Oberflächenpassivierung. In der Regel sind auch mehrere photolithographische Schritte [29] für die Definition der rückseitigen p- und n-Bereiche und für die Kontakte nötig, so daß dieses Konzept für die breite industrielle Produktion nicht geeignet ist, sondern mehr bei Konzentration- und Weltraumzellen Anwendung findet [24, 30-33].

1.3.2 Emitter-Wrap-Through-Zellen

Eine Möglichkeit auch bei kleiner Bulkdiffusionslänge die Einsammlung der nahe der Vorderseite generierten Ladungsträger durch einen auf der Rückseite angebrachten Emitterkontakt zu gewährleisten, ist die elektrische Verbindung von Frontemitter und rückseitig angeordneten Emitterfingern durch zahlreiche kleine, mit Emitter ausgekleidete Löcher im Wafer (Emitter-Wrap-Through, EWT-Zelle, Fig. 4) [6]. Der Durchmesser der Verbindungslöcher ist so gering ($< 100 \mu\text{m}$), daß die Frontseite einer EWT-Zelle praktisch nicht von der einer Hocheffizienz-Rückkontaktzelle zu unterscheiden ist. Durch dieses einheitlich homogene Aussehen (Fig. 5) eignen sich EWT-Zellen in Verbindung mit der fast lückenlosen Anordnung im Modul auch für Anwendungen im Fassaden- und Automobilbau.

Die räumliche Trennung von ladungsträger einsammelndem Frontemitter und kontaktiertem Rückseitenemitter vereinfacht die Verwendung eines Zwei-Stufen-Emitters (auch selektiver Emitter genannt, vgl. Kapitel 2.6.4). Ohne zusätzliche Justierschritte kann der Frontemitter (orange in Fig. 4) während eines ersten Diffusionsschritts schwach dotiert werden, um eine hohe Quantenausbeute auch im kurzwelligen Teil des Spektrums zu erzielen (vgl. Fig. 50). In einem zweiten Hochtemperaturschritt wird ein hochdotierter Emitter (rot in Fig. 4) auf der Rückseite und in den Verbindungslöchern eindiffundiert. Der hochdotierte Emitter ermöglicht einen kleinen Kontaktwiderstand zu den Fingern und zusätzlich hohe elektrische Leitfähigkeit innerhalb der Verbindungslöcher (siehe Kapitel 4.3.3).

Im Vergleich zu konventionellen Zellen ermöglicht die Verlegung der Emitterfinger auf die Rückseite breitere Finger und damit auch einen kleineren Serienwiderstandsbeitrag der Finger. Dieser Vorteil verringert sich allerdings dadurch, daß die Basismetallisierung nicht mehr ganzflächig, sondern ebenfalls als Grid ausgeführt wird (vgl. Kapitel 5.2.2).

Der größte Gewinn durch den zusätzlichen rückseitigen Emitter im EWT-Konzept gegenüber konventionellen Zellen ergibt sich, wenn die Basisdiffusionslänge etwa gleich der halben Zelldicke ist [6]. Ladungsträger, die in der hinteren Hälfte der Zelle generiert werden und die bei der konventionellen Zelle durch Rekombination im Bulk verloren wären, werden durch den rückseitigen Emitter eingesammelt und tragen so zum Gesamtstrom bei (vgl. Kapitel 5.3.1). Aus diesem Grund bestand großes Interesse daran, einen einfachen Prozeß zu entwickeln, der erlaubt, das Potential des EWT-Konzepts in Verbindung mit kostengünstigem Ausgangsmaterial industriell zu nutzen [34]. Das Zellkonzept der EWT-Zelle ist schon lange bekannt [6, 7, 10], wurde aber wegen zu geringem Wirkungsgrad und aufwendiger Prozeßschritte nie zur industriellen Anwendbarkeit gebracht (vgl. Tabelle 1-1).

Die Verbindungslöcher können durch einen gepulsten Laser oder durch überlappende um 90° versetzte Sägeschnitte in Vorder- und Rückseite der Zelle erzeugt werden wie z. B. bei der sog. POWER-Zelle (POLYcrystalline Wafer Engineering Result [17, 35]). In monokristallinem Silizium wurden die Löcher auch schon durch Maskierung und anisotropes Ätzen erstellt [10].

Weitere Möglichkeiten sind Ultraschall- und Wasserstrahlbohren: Diese beiden Verfahren ermöglichen eventuell, schon den ungewaferten Siliziumblock zu perforieren, um nicht jeden Wafer einzeln bohren zu müssen [16].

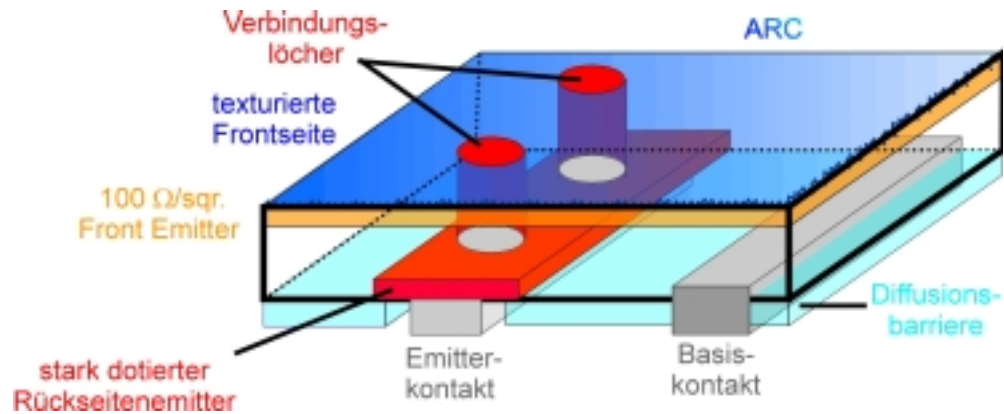


Fig. 4: Schematische Darstellung einer EWT-Zelle: Beide Kontakte liegen auf der Rückseite, der Frontemitter (orange) ist durch kleine Löcher (rot) mit dem Emitterkontakt auf der Rückseite elektrisch verbunden. Ladungsträger, die in der hinteren Hälfte der Zelle generiert werden, können durch den rückseitigen Emitter eingesammelt werden und so zum Gesamtstrom der Zelle beitragen [6].

Wegen der Verlegung der Emitterfinger auf die Zellrückseite müssen Basis- und Emitterfinger als ineinander verschachteltes (interdigitated) Grid ausgeführt werden. Die dadurch notwendige Aufteilung der Rückseite in p- und n⁺- Bereich erfordert in der Regel weitere Prozeß- und Justierschritte. Für die industrielle Herstellung steht Photolithographie (wie sie bei Hocheffizienzzellen verwendet wird) aus Kostengründen nicht zur Verfügung, so daß nach anderen Verfahren gesucht werden mußte.

Das verschachtelte Grid hat außerdem zur Folge, daß der Bereich, in dem p- und n⁺-dotierter Bereich an der Oberfläche aneinander stoßen, den einer konventionellen Zelle (Zellrand) um ein bis zwei Größenordnungen übertrifft (vgl. Kapitel 5.1.3). Erhöhte Rekombination in diesem Bereich verringert die Leerlaufspannung deutlich, deshalb müssen dort zusätzliche Störstellen, z. B. durch Schädigung der Oberfläche, auf jeden Fall vermieden werden [36].

Die bislang veröffentlichten Herstellungsverfahren unterscheiden sich in drei entscheidenden Punkten: Erzeugung der Verbindungslöcher, Definition von p- und n⁺-Bereichen auf der Zellrückseite und in der Art der Metallisierung. Für die Metallisierung industriell anwendbar ist einerseits Siebdruck und andererseits Plattierung (stromlose oder galvanische Metallabscheidung) [37-39].

Die Kontakte mittels Plattieren zu erzeugen, hat den Vorteil, daß sich auch die Verbindungslöcher mit Metall füllen lassen und etliche Justierschritte vereinfacht werden. Außerdem ist der Fingerwiderstand wegen des erreichbar hohen Fingerquerschnitts sehr gering (Buried Contact Verfahren [40]). Der Aufbau großtechnischer Plattieranlagen erfordert jedoch ein erhebliches Maß an Erfahrung (z. B. BP Solar, Madrid), weshalb sich kleinere Unternehmen oft scheuen, diese Technik anzuwenden. In [41, 42] wird die erfolgreiche Herstellung von EWT-Zellen mittels stromlosem Plattieren beschrieben.

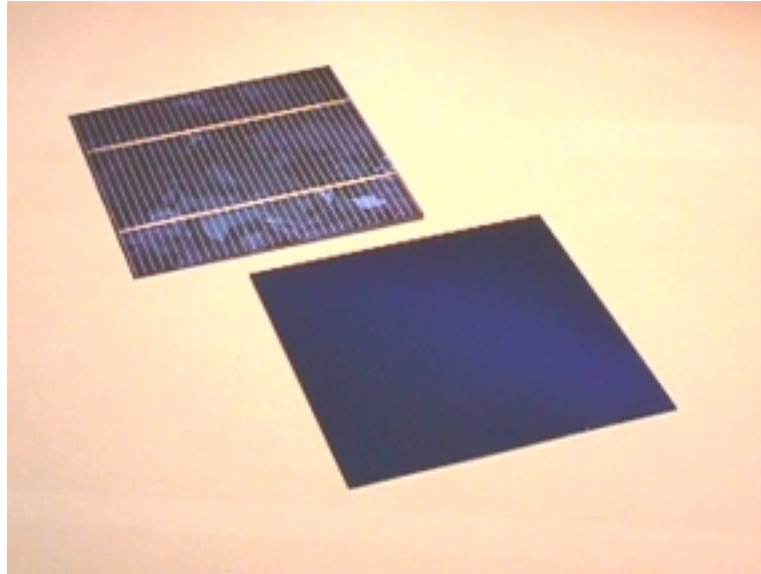


Fig. 5: Emitter-Wrap-Through-Rückkontaktsolarzelle (vorne) im Vergleich mit einer herkömmlichen Solarzelle. Weder Finger noch Busbars stören die optische Erscheinung der EWT-Zelle.

Siebdruck ist eine zuverlässige und industriell schon etablierte Methode für die Herstellung der Metallkontakte [19]. Je nach Fingerabstand und -breite übersteigen die Anforderungen an die Justierfähigkeiten des Siebdruckers die für eine herkömmliche Zelle notwendigen beträchtlich. In Verbindung mit einem automatischen Justiersystem eignet sich das Siebdruckverfahren jedoch auch für die Metallisierung der beiden ineinander verschachtelten Fingergrids auf der Rückseite einer EWT-Zelle. Alle bisher bekannten Verfahren zur Herstellung von EWT-Zellen unter Verwendung von Siebdruckmetallisierung (und mit Wirkungsgraden über 15 %) beinhalteten mindestens einen Photolithographieschritt und waren daher für die industrielle Herstellung nicht geeignet (siehe Tabelle 1-1). Wie in den folgenden Kapiteln gezeigt werden wird, eignet sich Siebdruck nicht nur für die Metallisierung, sondern auch für die Definition von p- und n-leitenden Bereichen auf der Zellrückseite.

1.3.3 Metallisation-Wrap-Around-Zellen

Beim MWA-Konzept (Metallisation-Wrap-Around) belässt man die Emitterfinger auf der Zellvorderseite, um das Bohren der zahlreichen Verbindungslöcher der EWT-Zelle zu umgehen. Nur die Busbars werden auf die Zellrückseite verlegt, um die Vorteile der vereinfachten Verschaltung im Modul zu nutzen (Fig. 6). Die elektrische Verbindung von Fingern und Busbar erfolgt dabei über den Zellrand. Dieses Konzept wurde von Jooß et al. [43] 2000 erstmals erfolgreich vorgestellt und patentiert; die Metallisierung erfolgte mittels „vergrabener“ Kontakte (Buried Contact) in Verbindung mit stromlosem Platieren. Die Buried Contact Methode erlaubt die Herstellung schmaler Finger (20 - 25 μm), die schon aus geringer Entfernung nicht mehr zu erkennen sind und deren Abschattungseffekt entsprechend klein ist. Die Metallisierung kann auch mittels Siebdruck erfolgen [8], jedoch reduzieren sich dadurch die Vorteile gegenüber der herkömmlichen Zelle auf die einfachere Verschaltung und die entfallende Abschattung durch die Busbars.

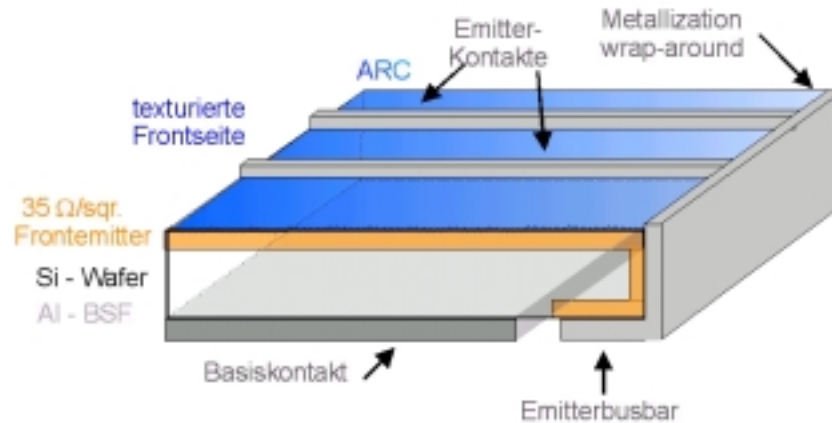


Fig. 6: Schema einer Metallisation-Wrap-Around (MWA)-Zelle. Der Emitterbusbar ist auf die Zellrückseite verlegt und über den Zellrand hinweg mit dem Frontgrid verbunden [8, 43].

Wegen des Serienwiderstandes in den Emitterfingern ist das MWA-Konzept nicht auf Zellgrößen über 160 cm^2 skalierbar: Die Verluste im Füllfaktor übersteigen dann den Gewinn durch die verringerte Abschattung [8, 43].

1.3.4 Metallisation-Wrap-Through-Zellen

Die Beschränkung der Zellgröße durch die Länge der Emitterfinger wird beim MWT-Konzept (Metallisation-Wrap-Through) dadurch umgangen, daß die Emitterfinger auf der Frontseite durch kleine, metallgefüllte Löcher mit dem Emitterbusbar auf der Zellrückseite verbunden werden [8, 16]. Gegenüber dem EWT-Konzept ist die Zahl der notwendigen Löcher wesentlich geringer, da die elektrische Verbindung von Vorder- und Rückseite über metallgefüllte Löcher erfolgt, deren Serienwiderstand kleiner ist als der der Verbindungslöcher von EWT-Zellen [44]. (Bei EWT-Zellen erfolgt der Stromtransport von Vorder- zu Rückseite in der Emitterschicht der Verbindungslöcher).

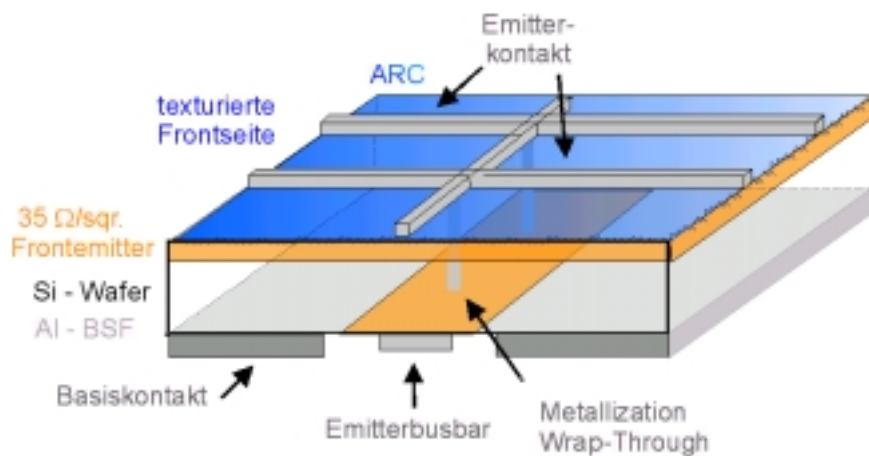


Fig. 7: Schema einer MWT-Zelle. Das Frontgrid ist durch wenige Verbindungslöcher mit dem Emitterbusbar auf der Zellrückseite verbunden [45].

Auch hier ist die Realisierung mittels Buried Contact Technologie der Metallisierung mittels Siebdruck überlegen [12, 45]. Da die Siebdruckpaste ihr Volumen während dem Feuerprozeß um etwa 60 % verringert (Verdampfen der organischen Bestandteile), stellen selbst völlig mit Paste gefüllte Löcher nach dem Feuern keinen sicheren elektrischen Kontakt zwischen Vorder- und Rückseite her [45]. Außerdem erfordern Siebdruckkontakte einen zusätzlichen – wenn auch schmalen – Busbar auf der Vorderseite, damit eine ausreichende elektrische Verbindung aller Finger mit dem Rückseitenbusbar gewährleistet ist [45].

1.4 Zusammenfassung

Vorteil aller Rückkontaktzellen gegenüber herkömmlichen Zellen ist die einfache Verschaltung im Modul, die durch „Pick and Place“ auf ein vorbereitetes Substrat (siehe Kap. 6) erfolgen kann. Hocheffizienz-Rückkontaktzelle und Emitter Wrap-Through Zelle halten zudem wegen ihrer einheitlichen Frontseite auch einem prüfenden Blick aus nächster Nähe stand, was ihre Eignung besonders für Fassaden und für Autoschiebedächer ausmacht (Fig. 8). Das Konzept der Hocheffizienz-Rückkontaktzelle ist wegen des benötigten hochwertigen und teuren Ausgangsmaterial (Fz-Silizium) nicht für die breite industrielle Anwendung geeignet. MWA- und MWT-Zelle bieten gegenüber konventionellen Zellen zwar den Vorteil der einfacheren Verschaltung, jedoch vermeiden sie nicht die Abschattung der Frontseite durch das Fingergrid. Aufgrund des rückseitigen Emitters können EWT-Zellen auch Ladungsträger einsammeln, die sonst wegen der beschränkten Diffusionslänge des Ausgangsmaterials für die Stromgewinnung verloren wären.

Tabelle 1-1: Auswahl der besten bisher veröffentlichten Rückkontaktzellen

	Metallisierung	pn-Bereichsdefinition	Material und Zellfläche	V_{oc} [mV]	η [%]
EWT, Plattierung [42]	stromloses Platieren	mechanisch strukturierte Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid	Cz, 24 cm ²	593	16,6
EWT [16]	Siebdruck	CVD Oxid als Diffusionsbarriere mit Photolithographie strukturiert	Fz, 41 cm ²	611	15,3
EWT [46]	Photolithographie, aufgedampfte Kontakte	CVD Oxid als Diffusionsbarriere, Photolithographie	Fz, 41 cm ²	623	18,1
VEST [47]	Siebdruck	Oxid als Diffusionsbarriere, mehrere Photolithographieschritte	Dünnschicht, 96 cm ²	600	16,0
MWA, Siebdruck [8]	Siebdruck	selbstjustiertes Plasmaätzen	Cz, 100 cm ²	613	17,0
IBC (Rückkontaktzelle) [25]	Photolithographie, aufgedampfte Kontakte	thermisches Oxid als Diffusionsbarriere und mehrere Photolithographieschritte	Fz, 4 cm ²	689	20,2
EWT [8]	Siebdruck	selbstjustiertes Plasmaätzen	mc, 100 cm ²	601	11,1
EWT [48]	Siebdruck	naßchemisches Entfernen des Emitters	mc, 100 cm ²	553	9,6

In Tabelle 1-1 ist eine Auswahl der besten bisher veröffentlichten Rückkontaktsolarzellen vorgestellt. Nur wenige Verfahren können ganz auf Photolithographieschritte verzichten, eignen sich also tatsächlich für die industrielle Fertigung. Hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses scheint sich das EWT-Konzept in Verbindung mit Siebdruck am besten für die industrielle Produktion zu eignen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, einen einfachen industrietauglichen Prozeß für die Herstellung von EWT-Zellen mit siebgedruckten Kontakten zu entwickeln und gleichzeitig das größtmögliche Wirkungsgradpotential auszuschöpfen. Der mit diesem Prozeß erzielbare Wirkungsgrad sollte etwa gleich groß wie der von konventionellen Solarzellen sein. Als Richtwert war in der Projektbeschreibung des „ACE Designs“ Projekts (in dessen Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde) ein Wirkungsgrad von 16 % festgelegt worden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in dieser Arbeit zwei Möglichkeiten der Locherzeugung und verschiedene Maßnahmen zur Definition des p- und n⁺-Bereiches untersucht. Außerdem wurde die Anordnung von Fingern und Busbars optimiert und mit Hilfe von Computersimulationen das Wirkungsgradpotential und die Grenzen des EWT-Konzeptes bestimmt.

In Tabelle 1-2 sind die Vor- und Nachteile von konventionellen und EWT-Zellen nochmals direkt gegenübergestellt.

Tabelle 1-2: Vor und Nachteile von EWT Rückkontakt und konventioneller Solarzelle.

konventionelle Zelle	EWT-Zelle
– Abschattung durch Frontgrid	+ keine Abschattung durch Frontgrid
– Trennen von parasitärem pn-Übergang am Rand nötig	+ kein Trennen des Zellrandes nötig
+ in Fronttextur müssen Stege für das Frontgrid vorgesehen werden	+ Texturierung ohne Rücksicht auf Frontgrid möglich
+ geringe Anzahl Prozeßschritte, keine besonderen Justierungsanforderungen	– aufwendigerer Prozeß wegen Löchererstellung und Justierschritten
– komplizierte Modulverschaltung	+ einfache, lückenlose Modulverschaltung per Pick and Place
– keine Lichteinsammlung von der Rückseite	+ Rückseitiger Emitter erhöht Einsammelwahrscheinlichkeit
– Mindestabstand im Modul, helle Frontkontakte beeinträchtigen das Aussehen	+ sehr ansprechendes Aussehen wegen der vollkommen einheitlichen Frontseite
+ ganzflächiges BSF	– BSF Wirkung wegen Fingergrid reduziert
+ hohe Leerlaufspannung durch BSF erzielbar	– leicht verringerte Spannung wegen oberflächenangrenzendem pn-Übergang
o ganzflächiger Basiskontakt, wegen Abschattung schmale Emitterfinger	o rückseitige Emitterfinger können breit sein, aber Basiskontakt muß auch als Grid ausgeführt werden

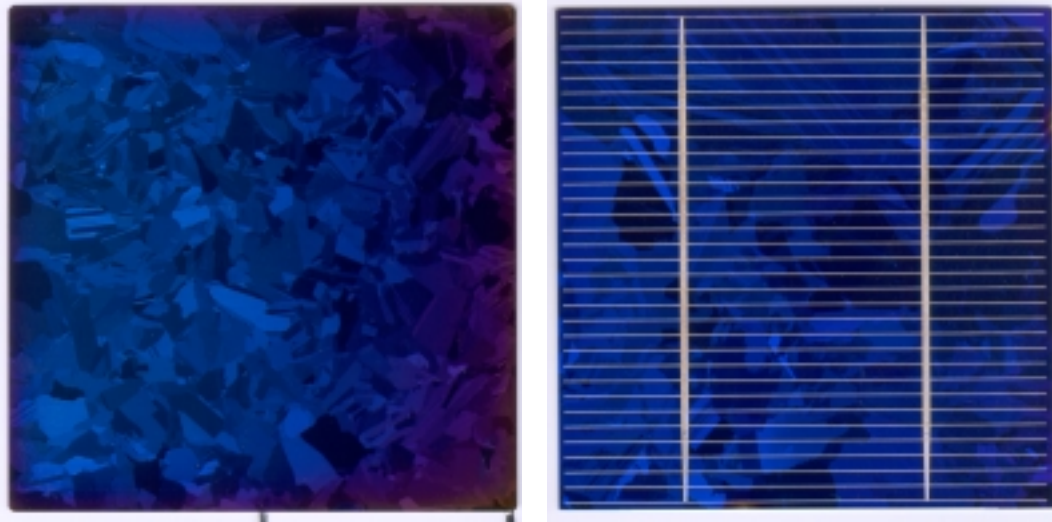


Fig. 8: Foto einer EWT-Zelle (links), bei der sich beide Kontakte auf der Rückseite befinden, und einer konventionellen Zelle mit siebgedrucktem Frontgrid (rechts). Beide Zellen $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

2. Kapitel - Prozeßtechnik

2.1 Einführung

Die erfolgreiche Umsetzung des EWT-Konzepts in ein industriell hergestelltes Endprodukt hängt entscheidend davon ab, inwieweit geeignete Prozeßtechniken für die Realisierung einer EWT-Zelle entwickelt werden können. Geeignet bedeutet in diesem Fall nicht nur die Verfügbarkeit, sondern auch die Finanzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Technologie.

Der Herstellungsprozeß von EWT-Solarzellen mit Siebdruckmetallisierung unterscheidet sich in zwei Punkten wesentlich von dem für konventionelle siebgedruckte Zellen: Den Verbindungslochern und der Definition der p- und n⁺-Bereiche auf der Zellrückseite. Weitere geringfügigere Unterschiede betreffen die Metallisierung: Finger zu drucken erfordert ein anderes Fließverhalten (Rheologie) der Pasten als der Druck eines ganzflächigen Kontaktes. Auch ist beim Druck von Fingern die Leitfähigkeit der Basismetallisierungspaste wichtiger als ihre Eigenschaft, ein gutes BSF auszubilden. Die zugehörigen Optimierungsberechnungen werden ausführlich in Kapitel 5 diskutiert.

Allgemein übliche Prozeßschritte wie Reinigungen, Sägeschadenätzen und POCl₃-Diffusion wurden aus Herstellungsprozessen für konventionelle Zellen übernommen [18, 19]. Auch wurde in der Regel Standard Cz-Silizium mit spezifischem Widerstand um 1 Ωcm (bordotiert mit 1,6*10¹⁶ cm⁻³) verwendet (vgl. Kapitel 5.4.4).

Zum besseren Verständnis der zur Herstellung von EWT-Zellen notwendigen Prozeßschritte ist in Fig. 9 ein Beispielprozeß dargestellt. Nach dem Bohren der Verbindungslöcher folgt die Definition von p- und n⁺-Bereich der Rückseite mittels einer Diffusionsbarriere: Die Diffusionsbarriere verhindert in der anschließenden Diffusion lokal die Eindiffusion von Phosphor. Dabei erfolgt auch die elektrische Trennung von rückseitigem p-Bereich und Frontemitter, für die bei konventionellen Zellen ein extra Prozeßschritt vorgesehen werden muß. Nach Abscheiden einer Antireflexionsschicht folgt noch der Druck der Kontakte, die beide gemeinsam gefeuert werden. Die Reihenfolge der Prozeßschritte kann auch anders gewählt werden, als sie hier angegeben ist. Anstatt die Emitterdiffusion lokal mittels Diffusionsbarriere zu verhindern, könnte z. B. auch der Emitter bereichsweise wieder entfernt werden.

Der Erfolg einiger Prozeßschritte hängt sehr vom verfügbaren Equipment ab: Die Justierung der ineinander verschachtelten Grids setzt eine optische Justiereinrichtung am Siebdrucker voraus, da bei industrieller Fertigung nicht jede Zelle zeitintensiv von Hand justiert werden kann. Die Verwendung von Siebdruckpaste erfordert ein entsprechendes Produktangebot der Pastenhersteller. Wegen des Anspruchs der industriellen Anwendbarkeit des Herstellungs-

prozesses wurden bei der Auswahl der Prozeßschritte immer auch Maschinenkosten und Durchsatz beachtet. Im Folgenden werden die verwendeten Prozeßschritte beschrieben, angefangen vom Bohren der Löcher über den Druck der Kontakte bis zur Antireflexionsschicht.

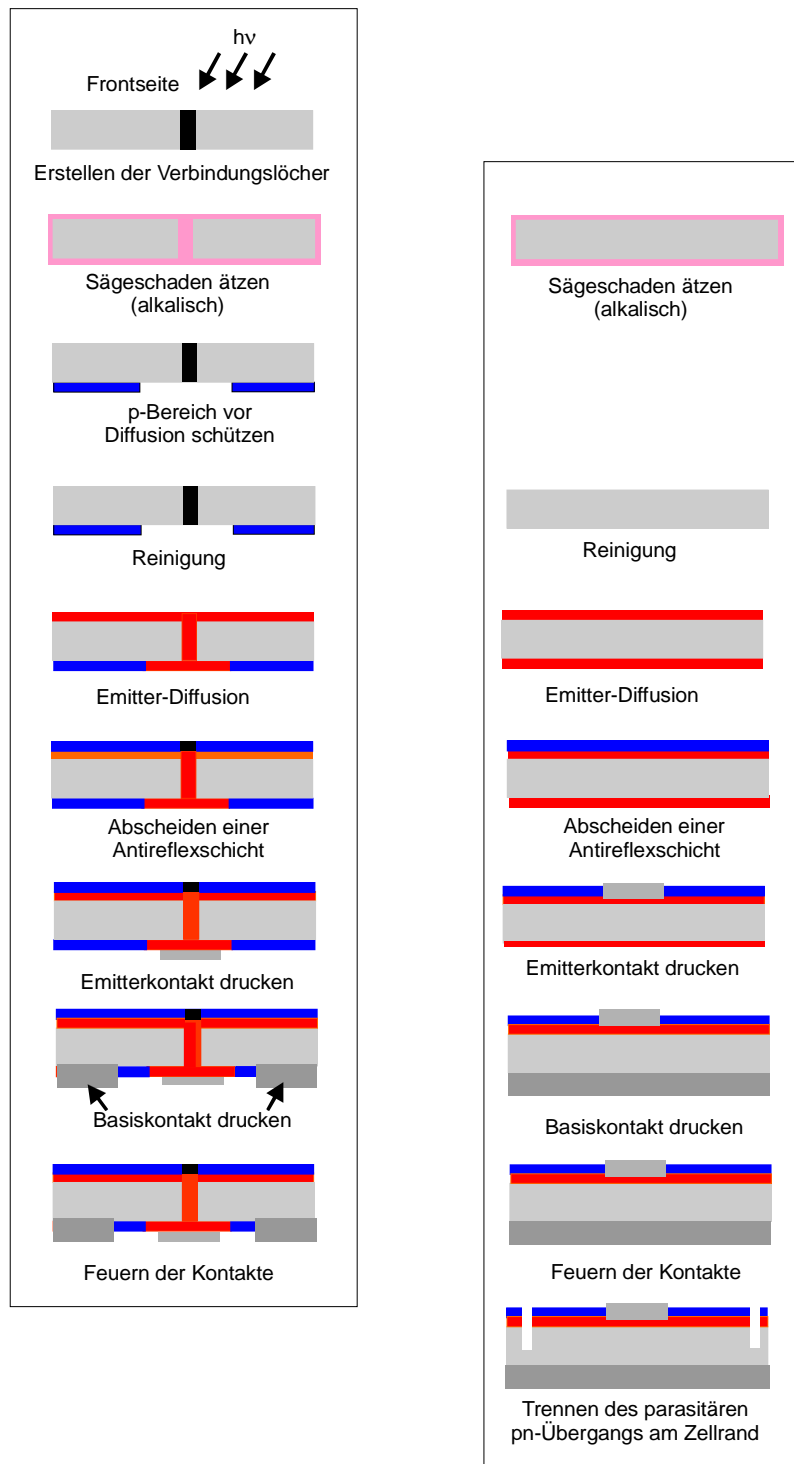


Fig. 9: Beispiel einer Prozeßsequenz für EWT-Zellen unter Verwendung einer Diffusionsbarriere für die Definition von p- und n-Bereichen der Rückseite. Zum Vergleich daneben die Herstellung von konventionellen Zellen.

2.2 Erzeugen der Löcher

Betrachtet man nur die elektrische Verbindung zwischen Vorder- und Rückseite der Zelle, so wäre es günstiger, den Wafer nicht mit einzelnen Löchern, sondern mit durchgehenden Schlitzten zu versehen (Fig. 10). Allerdings wird dadurch der Wafer so zerbrechlich, daß bisher kein Exemplar den Prozeß bis zum Siebdruck überlebt hat. Beim Siebdruck könnten die Schlitzte mit Metallisierungspaste gefüllt werden, was die Stabilität wieder etwas erhöhen würde [49]. Um den Ausschuß gering zu halten wurde jedoch auf Verbindungsschlitzte zugunsten von -löchern verzichtet.

Der Stabilitätsverlust ist auch der größte Nachteil der Sägetechnik (Fig. 11). Beim Erzeugen der Löcher durch Sägen wird der Wafer zwar nur halb durchtrennt, die Bruchrate ist dennoch sehr hoch. Lasergebohrte Löcher verringern die Bruchfestigkeit der Wafer hingegen nicht. In Tabelle 4-1 sind die Vor- und Nachteile beider Strukturierungstechniken nochmals aufgeführt.

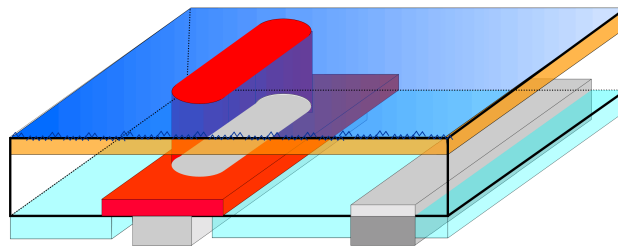


Fig. 10: Schlitzte statt Löcher. Elektrisch wegen höherer Leitfähigkeit vorteilhaft, jedoch wird der Wafer durch die zahlreichen Schlitzte sehr zerbrechlich (vgl. auch [8]).

2.2.1 Mechanische Strukturierung (Wafersäge)

Bei der mechanischen Strukturierung werden in Vorder- und Rückseite des Wafers Gräben gesägt. Die Grabentiefe ist dabei etwas größer als die halbe Waferdicke. An den Schnittpunkten der Gräben entsteht dann ein Verbindungsloch (Fig. 11) [50].

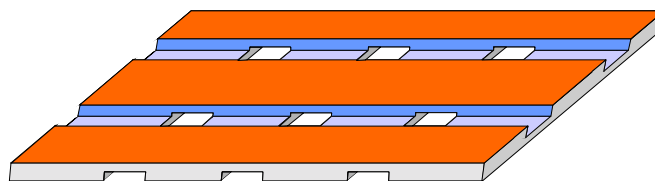


Fig. 11: Schemazeichnung eines mechanisch texturierten Wafers. In Vorder- und Rückseite werden um 90° versetzte Schnitte eingesägt, an den Schnittpunkten entstehen quadratische Löcher [50, 51].

Im Einzelblattmodus kann mit 20 mm/s gesägt werden, bei 40 Schnitten für eine 10 x 10 cm² Zelle errechnet sich daraus die reine Sägezeit zu etwa 7 min. Um den Durchsatz zu erhöhen, können einzelne Sägeblätter zu einem walzenähnlichem Werkzeug verbunden werden [19, 52]. Dabei ist denkbar, gleichzeitig auch die Oberfläche zwischen den Gräben mit einer mechanischen Mikrotextrurierung zu versehen. Die gesamte Strukturierungszeit könnte sich dadurch auf weniger als eine Minute pro Scheibe reduzieren. Die Maskierung von auf diese Art strukturierter Wafer bereitet jedoch gewisse Schwierigkeiten: An den Grabenkanten und

an den steilen Flanken (Fig. 11) entstehen oft Löcher in der maskierenden Schicht (Siliziumnitrid oder Maskierpasten) so daß Kurzschlüsse aufgrund von unerwünschter Diffusion die Folge sind.

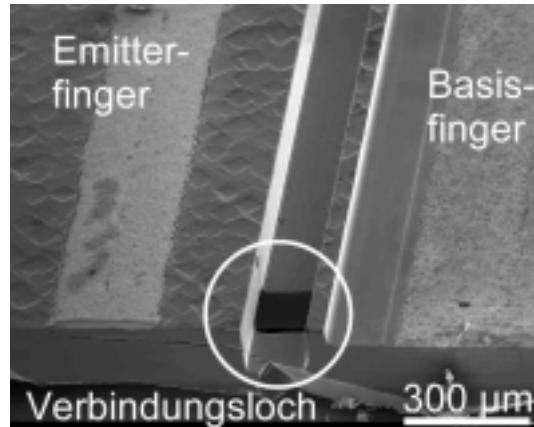


Fig. 12: Mit der Wafersäge durch zwei Schnitte in Vorder- und Rückseite erzeugtes Verbindungsloch. Links ein Emitterfinger, rechts ein Basisfinger. Unter und neben dem Basisfinger wurde der Emitter mit der Wafersäge abgefräst.

Weitere Schwierigkeiten ergeben sich beim Druck der Emitterkontakte: Durch Kapillareffekte läuft die Paste auch in die Frontgräben. Dies läßt sich umgehen, wenn die Kontaktfinger neben die Gräben gedrückt werden (Fig. 12).

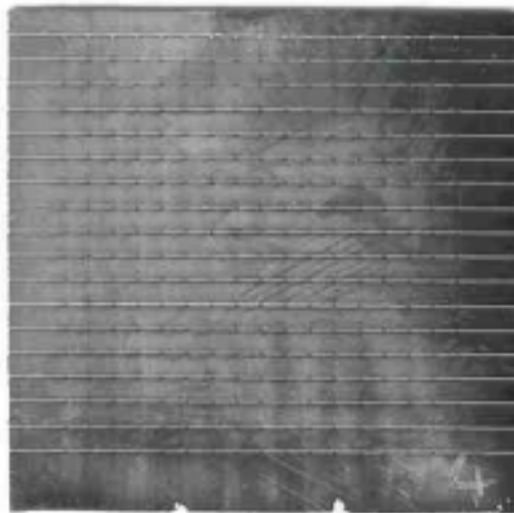


Fig. 13: Frontseite einer EWT-Zelle, bei der die Verbindungslöcher mittels Wafersäge erzeugt wurden (Zellfläche 25 cm²). Im Bereich des Basisbusbars (unten) werden keine Gräben in die Frontseite gesägt.

Für die quer zu den Fingern verlaufenden Busbars müssen unstrukturierte Stege belassen werden (Fig. 13). Solche Stege erhält man dadurch, daß das Sägeblatt rechtzeitig nach oben gefahren wird. Wegen der Rundung des Sägeblattes ist die Stegbreite jedoch größer als wünschenswert.

2.2.2 Laser

Zum Bohren der Verbindungslöcher wurde neben der Wafersäge auch ein Blitzlampen-gepumpter Nd-YAG Laser mit 75 W Ausgangsleistung im Multimode Betrieb verwendet. Die Laserenergie wird hier über einen piezogesteuerten Güteschalter (Q-Switch) puls förmig ausgekoppelt. Über eine Optik wird der Laserstrahl in einem Brennpunkt mit etwa 100 μm Durchmesser fokussiert. Ein Strahlteiler in dieser Optik erlaubt gleichzeitig die Betrachtung des Wafers mit einer CCD-Kamera (Fig. 14). Mittels xyz ϕ -Tisch wird der Wafer unter dem ortsfesten Strahl verfahren. Ein Computerprogramm [53] ermöglicht die gesamte Steuerung. Die Justierung der Tische erfolgt beim ersten Wafer optisch, dies wird durch einen kleinen Lichtfleck am Ort des Laserstrahls erleichtert. Anschließend können die zu lasernden Wafer am mechanischen Anschlag ausgerichtet werden (Fig. 15).

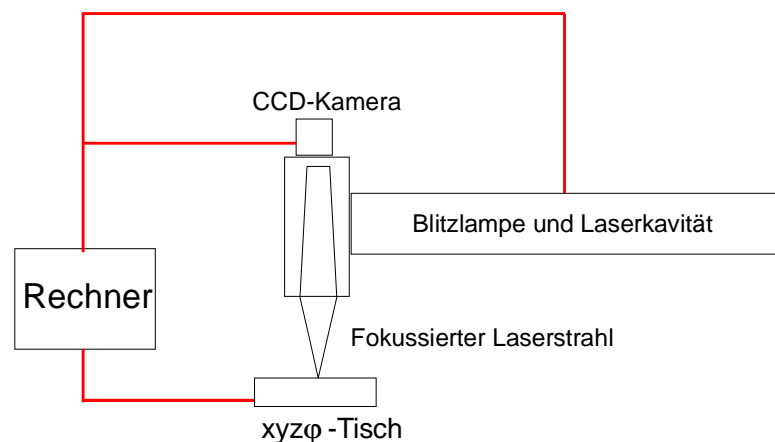


Fig. 14: Aufbau des verwendeten Lasers (gütegeschalteter Nd-YAG Laser mit 75 W Ausgangsleistung im Multimode Betrieb). Über den Rechner kann der xyz ϕ -Tisch und der Laser angesteuert werden. Gleichzeitig wird das Bild der CCD-Kamera, das über einen Strahlteiler durch die Laseroptik aufgenommen wird, auf dem Rechnerbildschirm eingeblendet.

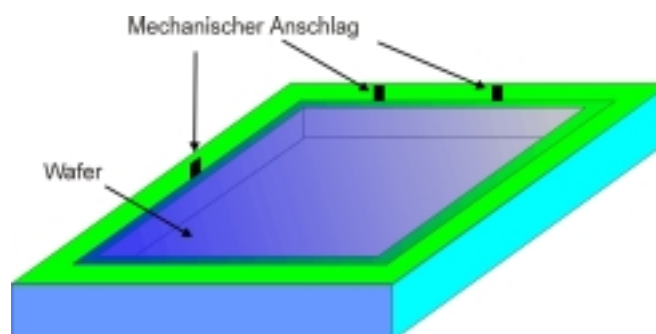


Fig. 15: Schema der Waferaufnahme mit dem mechanischen Anschlag. Der Wafer liegt nur am Rand auf der Aufnahme auf (ca. 1 mm breite Auflagefläche). Unter dem Wafer befindet sich ein 3 cm tiefer Hohlraum. Erreicht der Laserstrahl den Boden dieses Hohlraums, ist er schon so weit defokussiert, daß er keinen Schaden mehr anrichtet.

Die entstehenden Löcher verjüngen sich auf der laserabgewandten Seite um etwa 15 % (Fig. 16). Durch die Hitzeentwicklung beim Lasern wird das Silizium in der Umgebung des Loches geschädigt, durch den Materialauswurf bildet sich eine krater förmige Erhebung rund um die

Einschuß- und Austrittsstelle (Fig. 17). Dieser Laserschaden kann in einem alkalischen Ätzbad entfernt werden; nach dem Ätzbad beträgt der Lochdurchmesser 80 - 100 μm (Fig. 17 und Fig. 18).

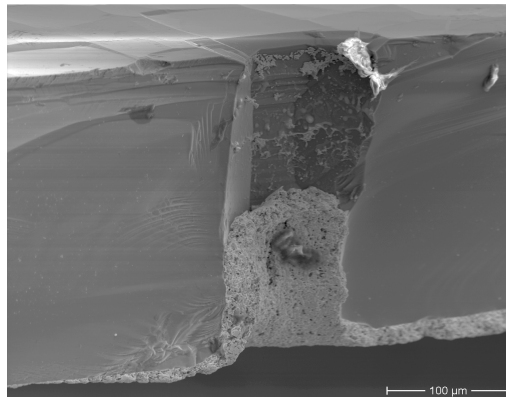


Fig. 16: Lasergebohrtes Verbindungsloch (von der Rückseite her teilweise mit Metallisierungspaste gefüllt). Die Löcher haben eine konische Form, auf der laserabgewandten Seite verjüngen sie sich um etwa 15%. Nach Ätzen des Laserschadens beträgt der Lochdurchmesser 80 -100 μm .

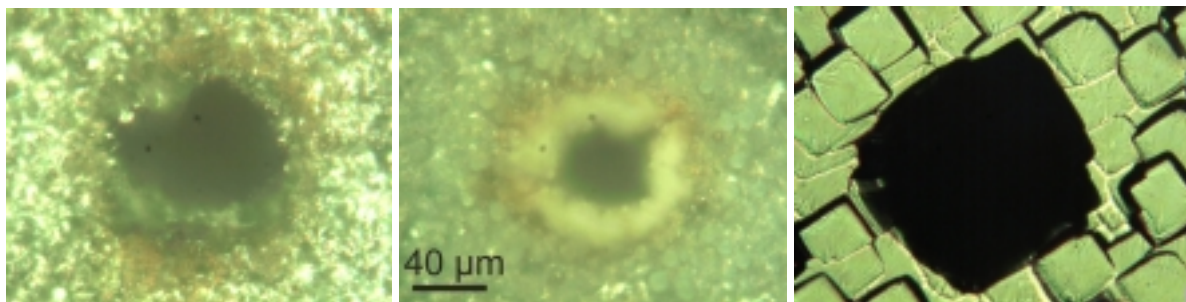


Fig. 17: Bilder eines lasergebohrten Verbindungsloches (optisches Mikroskop). Das linke Bild zeigt die Einschuisseite, das mittlere die Austrittsstelle und das rechte Bild die Einschuisseite nach alkalischem Ätzen. Vor dem Ätzen ist ein Kraterrand um das Loch zu erkennen, nach dem Ätzen ist in der Lochumgebung keine Veränderung der Oberfläche durch die Laserbehandlung mehr zu sehen.

Nach Abscheiden einer Siliziumnitridschicht als ARC sind die 100 μm großen Verbindungs-löcher mit bloßem Auge kaum noch zu erkennen. Anders als bei der Strukturierung mittels Wafersäge ist das Aussehen der Zellvorderseite völlig einheitlich (Fig. 18).

Die thermische Belastung des Wafers beim Lasern ergibt sich nach folgender Rechnung: Pro Loch werden in 100 msec etwa 100 mJ auf den Wafer übertragen [46]. Bei 4000 Löchern für eine 10 x 10 cm^2 EWT-Zelle ergibt das eine thermische Belastung von 40 W, wenn alle Löcher innerhalb von 10 sec gelasert werden. 40 W entspricht etwa der Erwärmung unter 4 Sonnen und ist als unproblematisch anzusehen. Um diesen Durchsatz tatsächlich zu erreichen, müßte die Laserleistung deutlich erhöht werden, so daß über Beam-Splitter und Spiegelkopf viele Löcher gleichzeitig gebohrt werden könnten.

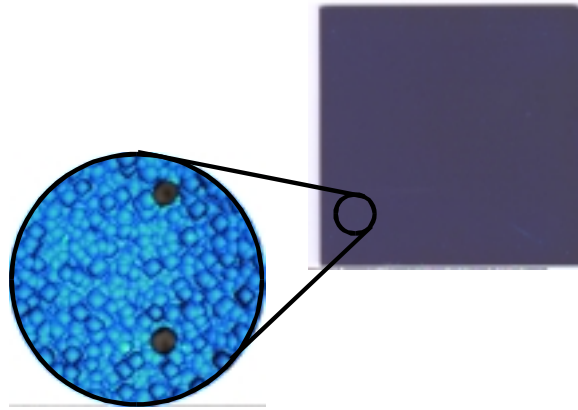


Fig. 18: Bild einer EWT-Zelle mit Antireflexschicht (Zellfläche 25 cm²). Die Löcher sind mittels Laser gebohrt und mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Links ist eine Vergrößerung zweier Löcher (optisches Mikroskop) gezeigt. Der Lochdurchmesser beträgt 80 µm.

Tabelle 2-1: Nach Optimierungsuntersuchungen gewählte Parameter für den 75 W Nd-YAG Laser

Parameter	Einzelstschrittmodus	kontinuierlicher Modus
Blitzlampenstrom	17,5 A	22,5 A
Pulswiederholffrequenz	2000 Hz	2000 Hz
Verfahrgeschwindigkeit	60 cm/s	5 cm/s
Beschleunigung	100 cm/s ²	100 cm/s ²
Laserzeit für 10 x 10 cm ² Wafer mit 4000 Löchern	40 min	18 min

Der Blitzlampenstrom und die Pulswiederholffrequenz sind die wichtigsten Parameter, die am Laser eingestellt werden können. Wegen der beschränkten Datenübertragungsrate zwischen dem Rechner und den einzelnen Steuergeräten und wegen der großen Masse des xyzφ-Tisches benötigt das Verfahren der Tische von Loch zu Loch wesentlich mehr Zeit, als das Löcherbohren selber. Um der Geschwindigkeitsbeschränkung durch die limitierten Datenübertragungsraten und die Beschleunigung der Tische zu entgehen, wurde auch ein kontinuierlicher Modus eingerichtet. Im kontinuierlichen Modus werden die Tische ohne Zwischenstop verfahren und dabei der Laser ein- und ausgeschaltet. Die maximal mögliche Verfahrgeschwindigkeit ist dann durch die Laserleistung begrenzt und der Durchsatz mehr als doppelt so groß wie im Einzelstschrittmodus (Tabelle 2-1).

2.3 Rückseitendefinition, Trennung von p- und n⁺-Bereich

Um beide Kontakte auf der Zellrückseite aufbringen zu können, müssen dort räumlich und elektrisch getrennte n⁺- und p-Bereiche definiert werden (Fig. 19). Die Bereiche müssen als ineinander verzahntes Grid ausgeführt werden, damit der mit der Entfernung quadratisch anwachsende Serienwiderstandsbeitrag von Frontemitter und Basis in vertretbarem Rahmen bleibt (vgl. Kapitel 5.2.2). In der Regel muß auch eine Verbindung der jeweiligen Finger untereinander auf dem Wafer vorgesehen werden (Busbar).

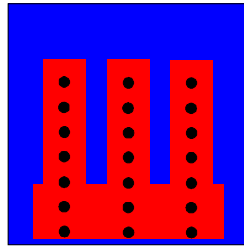


Fig. 19: Schema der Rückseite einer EWT-Zelle. Die Fläche, die vom rückseitigen Emitter (rot) bedeckt ist, muß vom Gebiet der Basiskontakte (blau) elektrisch getrennt werden.

Für die Definition der n^+ - und p-Bereiche stehen grundsätzlich zwei Wege zur Auswahl: Entweder wird die gesamte Rückseite der Phosphordiffusion ausgesetzt und der entstandene Emitter wird in einem nachfolgenden Schritt bereichsweise wieder entfernt. Oder der spätere Basisbereich wird durch eine Diffusionsbarriere (z. B. Siliziumnitrid oder Siliziumoxid) so maskiert, daß dort die Eindiffusion von Phosphor verhindert wird. Siliziumnitrid und -oxid können nur ganzflächig abgeschieden werden, so daß eine Bereichsdefinition in einem weiteren Prozeßschritt erfolgen muß. Das teilweise Entfernen der Emitter- oder Siliziumnitridschicht kann auf verschiedene Arten realisiert werden, mehrere Verfahren dazu werden im Folgenden vorgestellt. Prozeßtechnisch einfacher ist eine dritte Methode, die darin besteht, eine Diffusionsbarriere in der endgültigen Form mittels Siebdruck direkt aufzudrucken (Fig. 20).

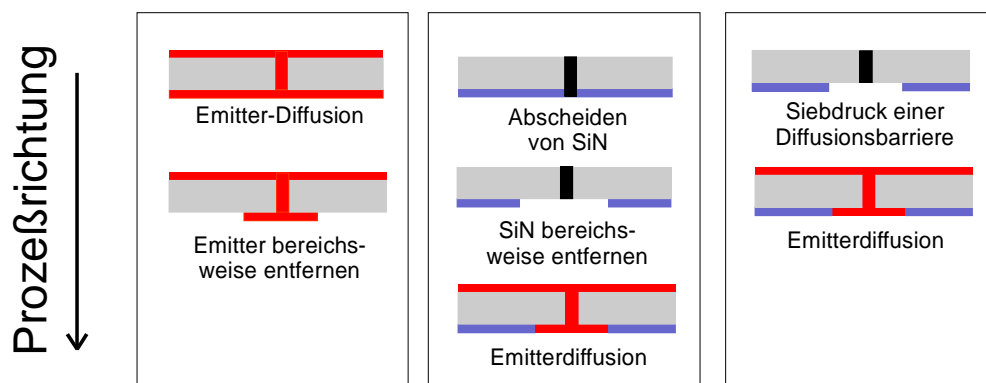


Fig. 20: Definition von Emitter- und Basisbereich auf der Rückseite einer EWT-Zelle. Links wird der Emitter nach der Diffusion teilweise wieder entfernt. Die Eindiffusion von Phosphor kann auch durch eine Diffusionsbarriere verhindert werden. Siliziumnitrid eignet sich als Diffusionsbarriere, kann aber nur ganzflächig abgeschieden werden (Mitte). Einfacher ist die Verwendung einer siebdruckbaren Diffusionsbarriere (rechts).

2.3.1 Lokales Entfernen dünner Schichten

Sowohl Emitter als auch Siliziumnitrid bestehen aus einer dünnen, höchstens wenige Mikrometer dicken Schicht. Für die Definition von p- und n-Bereichen auf der Rückseite einer EWT-Zelle muß entweder der Emitter oder die Siliziumnitridschicht bereichsweise wieder entfernt werden. Der Übersichtlichkeit halber ist im Folgenden nur das lokale Entfernen der Emitterschicht beschrieben. Die drei aufgeführten Methoden eignen sich jedoch ebenso zum Entfernen einer Siliziumnitrid- oder -oxidschicht.

Die Verwendung einer SiN-Schicht bei der Bereichsdefinition hat den großen Vorteil, daß Emitter- und Basisbereiche optisch unterscheidbar sind. Die farbige Schicht erlaubt dadurch, die Justierung der Kontakte zu kontrollieren und zu korrigieren.

2.3.1.1 Mechanisches Wegfräsen mittels Wafersäge

Die unerwünschte Emitterschicht kann bereichsweise mit der Wafersäge weggefräst werden. Für die Untersuchungen wurde hier ein 150 µm breites rechteckiges Sägeblatt verwendet. Es ist durchaus denkbar, anstatt eines einzelnen Sägeblatt eine Strukturierungswalze zu verwenden und damit den Durchsatz zu erhöhen. Da nur wenige Mikrometer vom Wafer abgetragen werden müssen, kann die Vorschubgeschwindigkeit zu 40 mm/s oder mehr gewählt werden. Die Sägetiefe ist durch die Unebenheit des Wafers vorgegeben ($\Delta = \pm 15 \mu\text{m}$), die Dicke des Emitters dagegen beträgt nur 1 - 2 µm.

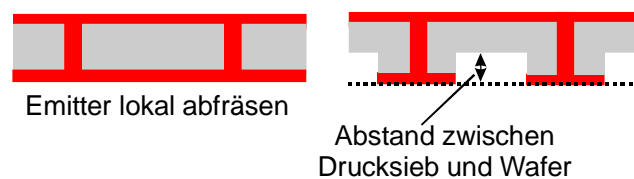


Fig. 21: Abfräsen des Emitters mittels Wafersäge. Wegen der Waferunebenheit muß die Sägetiefe größer als die Dicke des Emitters sein. Beim Drucken der Basiskontakte liegt das Drucksieb nicht am Wafer an.

Die Methode hat zwei große Nachteile: Der Sägeschaden kann nicht weggeätzt werden, da der übrige Emitter sonst mit entfernt würde, und der Höhenunterschied zwischen Basis- und Emitterbereich erschwert den Siebdruck (Fig. 21, vgl. auch Fig. 12). Die Fingerverbreiterung aufgrund des Höhenunterschieds beträgt ca. 80 % (Fig. 22). Wird ein einzelnes Sägeblatt verwendet, dauert das Entfernen des Emitters 2 - 3 min pro 10 x 10 cm² Wafer. Wegen der Rundung des Sägeblatts (oder auch der Walze) ist das Fräsende nicht genau definiert: Der Abstand zwischen dem Ende eines Basisfingers und dem angrenzenden Emitterbusbar muß daher größer sein als durch die Justierunsicherheit beim Siebdruck vorgegeben wäre.

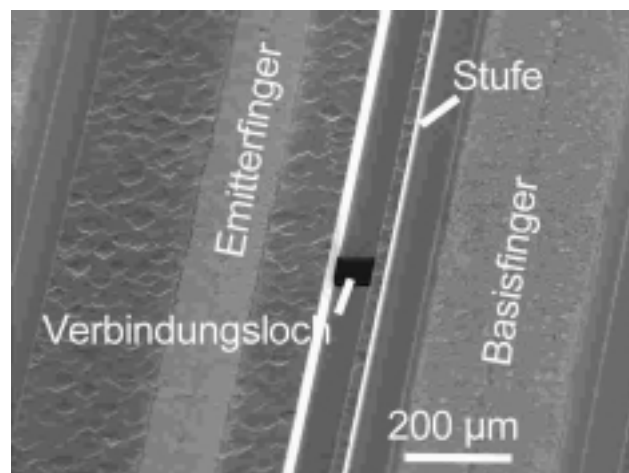


Fig. 22: Fingerverbreiterung durch den Höhenunterschied, der beim Abfräsen des Emitters entsteht. Emitter- und Basisfinger haben die gleiche Sieböffnung, dennoch ist der gedruckte Basisfinger fast doppelt so breit.

2.3.1.2 Laser

Bei geeigneter Wahl der Laserparameter ist es möglich, nur wenige Mikrometer Silizium zu entfernen. Der dabei entstehende Oberflächenschaden ist geringer als beim Fräsen mit der Wafersäge, aber verschlechtert ebenfalls die elektrischen Eigenschaften der Zelle [54]. Diese Methode wird ausführlich in [48, 54] beschrieben. Da der Laserschaden nicht entfernt werden kann, erreicht der Wirkungsgrad solchermaßen hergestellter Zellen nicht das Niveau von EWT-Zellen mit Diffusionsbarriere (siehe Kapitel 4). Um den Laser- bzw. Sägeschaden entfernen zu können, wäre es denkbar, nach der Emitterdiffusion eine Siliziumnitridschicht auf beiden Seiten des Wafers abzuschneiden. Diese Schicht könnte gleichzeitig mit dem darunterliegenden Emitter bereichsweise entfernt werden und den nach dem Lasern/Sägen übrigbleibenden Emitter vor dem anschließenden Ätzbad schützen. Allerdings scheiterte dies bisher bei allen Versuchen an der ungenügenden SiN-Abscheidung innerhalb der Löcher: Beim Druck von Ag-Paste in die Löcher kam es häufig zu Kurzschlüssen mit der beim Ätzen freigelegten Basis.

2.3.1.3 Trockenätzen

Trockenätzen ist eine gute Alternative zu naßchemischen Ätzbädern [55-57]. Die Dissoziation der den Ätzvorgang verursachenden Moleküle erfolgt dabei nicht in wäßriger Lösung, sondern durch Einstrahlen von Hochfrequenz- oder Mikrowellenstrahlung. Die Ätzrate kann über einen weiten Bereich variiert werden, wobei höhere Ätzraten auch die Waferoberfläche durch Ionenbeschuß stärker schädigen. Für die Untersuchungen an EWT-Zellen wurde eine kleine Plasmaätzenanlage aufgebaut (Fig. 23). Es handelt sich hierbei um ein mikrowellengezündetes Direktplasma, d. h. die Dissoziation der Prozeßgase erfolgt durch Mikrowellen am Ort des zu ätzenden Wafers. Die Waferoberfläche wird durch die Plasmastrahlung (UV) und in geringem Maß durch Ionenbeschuß geschädigt [58]. Als Prozeßgas wird Tetrafluormethan (Freon, CF_4) verwendet. Fluor ätzt allerdings nur Siliziumoxide und -nitride [57]. Soll auch Silizium selber geätzt werden, muß es zuvor oxidiert werden, weshalb im verwendeten Plasmaätzen auch Sauerstoff zugeführt werden kann. Der Prozeß wird unter Vakuum (0,2 - 0,7 mbar) durchgeführt. Als Parameter können Druck, Mikrowellenleistung, Prozeßgaszusammensetzung und Prozeßzeit gewählt werden.

Prozeßgase: CF_4 und O_2

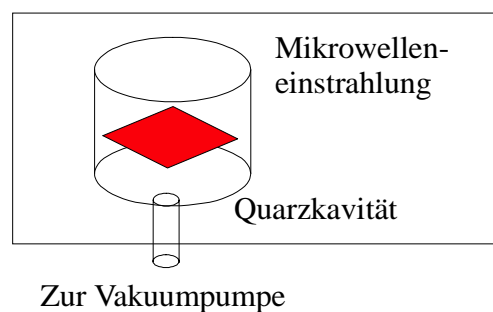


Fig. 23: Schemazeichnung des verwendeten Plasmaätzers. Es können Wafer (rot) bis 10 cm Kantenlänge geätzt werden. Von oben strömt das Prozeßgas ein: Ein Gemisch aus Tetrafluormethan (CF_4) und Sauerstoff (O_2). Durch die Mikrowellenstrahlung werden die Moleküle aufgespalten und ionisiert, so daß sich Fluor- und Sauerstoffradikale bilden.

Eine vom prinzipiellen Aufbau gleiche Anlage wird industriell zur Trennung des parasitären pn-Übergangs herkömmlicher Zellen verwendet. Dabei werden etwa 100 diffundierte Wafer übereinandergestapelt und mit einem Aluminiumblock beschwert. Bei EWT-Zellen muß jedoch nicht der Waferrand, sondern der Emitter zwischen Emitter- und Basisfingern auf der Waferrückseite entfernt werden. Das bedeutet, daß in der hier verwendeten Anlage jeweils nur ein Wafer geätzt werden kann. Der Durchsatz ist bei einer Ätzdauer von etwa 6 min pro Wafer, die durch Belüften und Abpumpen noch erhöht wird, sehr bescheiden. In der Halbleiterindustrie werden jedoch auch Plasmaätzter verwendet, die eine wesentlich größere Kapazität haben. In [57] wird die Plasmaätztechnologie ausführlich beschrieben.

Der Rückseitenemitter, die Zellvorderseite und das Innere der Löcher muß wieder lokal mit einer Ätzbarriere geschützt werden. Das Risiko der ungenügenden Maskierung der Löcher und Lochränder besteht hier auch, ist aber bei Verwendung eines hochviskosen Lacks, der am einfachsten mittels Siebdruck aufgebracht wird, geringer als beim naßchemischen Ätzen.

Eine elegante Methode, den Rückseitenemitter bereichsweise mittels Trockenätzen zu entfernen, besteht darin, die siebgedruckten Finger als selbstjustierende Ätzbarriere [59-61] zu verwenden, wodurch ein Justierschritt entfällt (Fig. 46). Allerdings werden die silberenthaltenden Kontakte von den Fluorradikalen merklich angegriffen.

2.3.2 Diffusionsbarrieren

Anstatt den Emitter nach der Diffusion bereichsweise zu entfernen, wird bei dieser Methode die Eindiffusion von Phosphor lokal durch eine Diffusionsbarriere verhindert. Eine Diffusionsbarriere ist eine dünne Schicht (ca. 100 nm dick), die folgende Eigenschaften besitzen sollte:

- Resistenz gegen verdünnte Flußsäure, um den Wafer vor der folgenden Diffusion reinigen zu können
- sehr kleine Diffusionskonstante gegenüber Phosphor, um Eindiffusion zu verhindern
- Sichtbarkeit auch nach der Diffusion, da dies die Justierung der Kontakte sehr vereinfacht (Fig. 29).

2.3.2.1 Siliziumnitrid

Siliziumnitrid erfüllt diese Anforderungen, kann aber nur ganzflächig abgeschieden werden, so daß ein weiterer Prozeßschritt zur Bereichsdefinition folgen muß (vgl. Kapitel 2.3.1). Untersucht wurde wiederum mechanisches Wegfräsen und Weglasern der Siliziumnitridschicht als auch Plasmaätzen (Kapitel 2.3.1.3). Siliziumnitrid wirkt als Ätzbarriere in alkalischen Ätzbädern, durch Wegfräsen oder -lasern entstandener Oberflächenschaden kann folglich naßchemisch entfernt werden. Beim Entfernen mittels Plasmaätzen muß im Gegensatz zum Lasern oder Sägen eine bereichsweise Maskierung der SiN-Schicht mit einer Ätzbarriere erfolgen. (Außer durch Plasmaätzen ist auch naßchemisches Entfernen des Siliziumnitrid in einem sauren Ätzbad möglich [9]). Die notwendige Maskierschicht wird am einfachsten in Form eines organischen Lacks mittels Siebdruck aufgedruckt. Der in Fig. 24 dargestellte Teilprozeß zur Bereichsdefinition – unter Verwendung von Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere – zeichnet sich durch Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit aus.

Blasenbildung beim Druck bzw. beim Trocknen der Ätzbarriere führte nur selten zu lokalen Kurzschlüssen (Fig. 25).

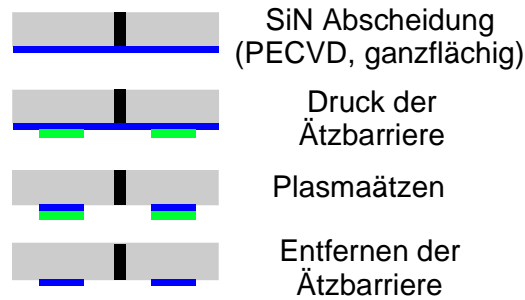


Fig. 24: Teilprozeß zur Definition des rückseitigen p- und n⁺- Bereiches. Siliziumnitrid wird auf der Zellrückseite ganzflächig abgeschieden. Ein organischer Lack, der resistent gegen Plasmaätzen ist, wird aufgedruckt und getrocknet. Im Plasmaätzter wird das Siliziumnitrid an den von Lack unbedeckten Stellen abgeätzt. Abschließend muß der organische Lack wieder entfernt werden.

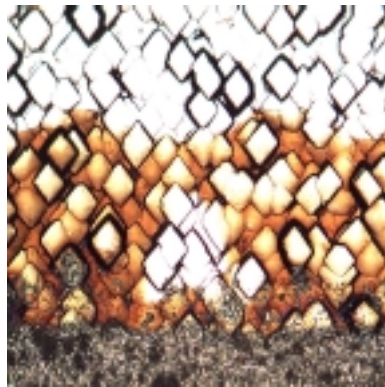


Fig. 25: Vergrößerung (optisches Mikroskop) der Diffusionsbarriere (Siliziumnitrid) . Unten im Bild ist noch ein Teil des Basisfingers zu erkennen. Vermutlich wegen einer winzigen Blase im Lack, der als Maskierschicht beim Plasmaätzen dient, ist die Diffusionsbarriere an dieser Stelle unterbrochen, was zu einem lokalen Kurzschluß führen kann.

2.3.2.2 Siebdruckgeeignete Paste als Diffusionsbarriere

Die Verwendung einer siebdruckbaren Paste als Diffusionsbarriere erspart die zusätzliche Bereichsdefinition, da sie gleich im gewünschten Muster aufgedruckt werden kann. Dadurch werden deutlich weniger Prozeßschritte als für die Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid benötigt (Fig. 26).



Fig. 26: Siebdruck einer Paste, die die Eindiffusion von Phosphor verhindert. Statt der in Fig. 24 vorgestellten vier Prozeßschritte für die Erstellung der Diffusionsbarriere wird nur noch einer (Drucken und Feuern) benötigt. Die Barrierenpaste bedeckt hier nur einen schmalen Streifen zwischen Emitter- und Basisbereich und nicht den gesamten Basisbereich.

Die Herstellerfirmen von Siebdruckpasten bieten mehrere Pasten an, die als Diffusionsbarriere geeignet sein sollen. Diese Pasten werden häufig „Annulus“ (engl.: Ring) Pasten genannt,

weil sie ringförmig am Waferrand aufgedruckt werden. Sie sind dafür konzipiert, bei konventionellen Zellen die n^+ -Diffusion am Waferrand zu verhindern, um die Notwendigkeit zu vermeiden, den parasitären pn-Übergang zu trennen. Die Zusammensetzung der Pasten wird von den Herstellerfirmen geheimgehalten. Möglicherweise sind Übergangsmetalloxide beigemischt, die beim Feuern eine glasartige Schicht auf dem Wafer bilden.

Um die diffusionsverhindernde Wirkung der Barrierenpasten zu prüfen und um die optimalen Feuerparameter für diese Pasten zu finden, wurden Wafer mit einer Teststruktur bedruckt und mit Kontakten versehen (Fig. 27). Nur eine der untersuchten Pasten erfüllte tatsächlich alle Anforderungen an eine Diffusionsbarriere für EWT-Zellen. Der Vergleich von Testwafern, die bei unterschiedlich hohen Temperaturen gefeuert worden waren, ergab, daß die beste Barrierenwirkung bei hohen Feuertemperaturen und kleinen Gürtelgeschwindigkeiten erreicht wird.

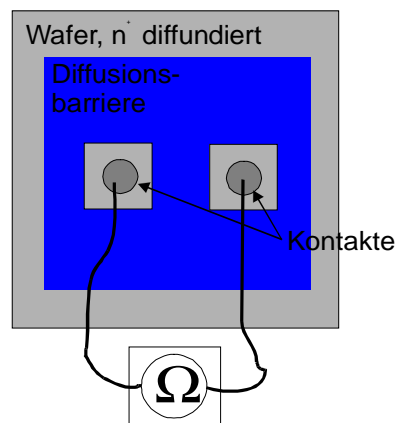


Fig. 27: Untersuchung der Diffusionsbarriere. Ein Siliziumwafer wird mit der Barrierenpaste (blau) bedruckt und gefeuert, dabei bleiben zwei 1 cm^2 große, nicht zusammenhängende Flächen unbedeckt. Anschließend wird der Wafer n^+ -diffundiert. In diese Flächen wird jeweils ein Kontakt aus Ag-Paste gedruckt (und gefeuert) und der elektrische Widerstand zwischen den beiden Kontakten bestimmt.

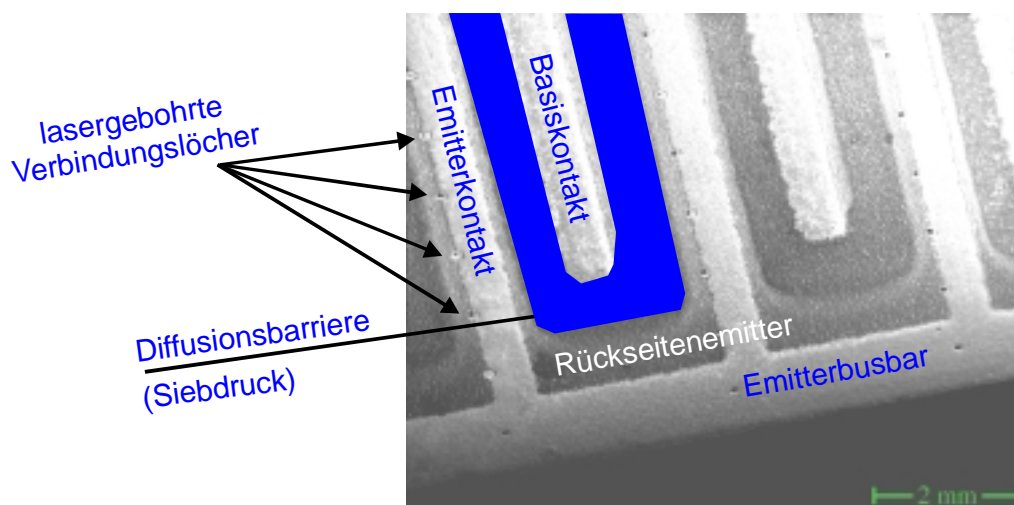


Fig. 28: SEM-Bild der Rückseite einer fertigen EWT-Zelle. Zur Verdeutlichung ist im Bild die siebgedruckte Diffusionsbarriere eines Fingers blau unterlegt. Zu erkennen sind auch die winzigen lasergebohrten Löcher, die Vorder- und Rückseite elektrisch miteinander verbinden.

Wegen der enormen Vereinfachung, die die Entwicklung dieses Teilprozesses für die Herstellung von EWT-Zellen und anderen Zellen mit verschachteltem Fingergrid bedeutet, wurde die Herstellung von EWT-Zellen mittels siebgedruckter Diffusionsbarriere zum Patent angemeldet.

Da die Basismetallisierungspaste nur einen schlechten Kontakt mit dem Silizium entwickelt, wenn sie auf die Barriere gedruckt wird, wird die Barrierenpaste mäanderförmig aufgebracht und bedeckt nur einen schmalen Streifen zwischen Emitter- und Basisbereichen (Fig. 28 und Fig. 29). Die n^+ -Schicht unter dem Basiskontakt wird durch das in der Basismetallisierungspaste enthaltene Aluminium überkompensiert.



Fig. 29: Ausschnitt aus einer $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Zelle, bei der die Diffusionsbarriere aufgedruckt und ge feuert wurde. Die Kontakte fehlen noch. Die Barrierenpaste bedeckt nur einen schmalen, mäanderförmigen Streifen zwischen Basis- und Emitterbereich. Die unmittelbar nach dem Druck farblose Schicht wird nach dem Feuern dunkelblau; der Druck der Kontakte kann dadurch – wenn nötig – nachjustiert werden.

2.3.3 Weitere Methoden zur lokalen p- und n^+ - Definition

Zwei weitere Methoden zur Erzeugung von lokal getrennten p- und n^+ -Bereichen auf der Zellrückseite sind die Co-Diffusion [62-64]. und das lokale Aufbringen einer Phosphorpaste [65]. Bei der Co-Diffusion wird auf den späteren Basisbereich Aluminium durch eine Schattenmaske aufgedampft und während der Phosphordiffusion einlegiert. Bei Wahl der richtigen Prozeßparameter bildet sich während der Diffusion ein sperrender pn-Übergang zwischen n^+ -dotiertem Bereich und Aluminium-Silizium Legierung. Die mittels Siebdruck aufgebraachte Aluminium-Paste stellt aufgrund ihrer unbekanntens Zusammensetzung ein hohes Kontaminationsrisiko für den Diffusionsofen dar, so daß diese Methode nicht untersucht werden konnte.

In Kapitel 2.6.2 wird eine siebdruckbare Phosphorpaste vorgestellt, die auch lokal aufgedruckt werden kann [66]. Die Phosphordiffusion erfolgt jedoch nicht nur unter der aufgedruckten Schicht, sondern durch die Umgebungsluft auch in den benachbarten Bereichen; sogar auf der Zellrückseite kann noch Phosphor nachgewiesen werden [67]. Die Verwendung von siebdruckbarer Phosphorpaste ersetzt also nicht die bei POCl_3 -Diffusion notwendige Maskierschicht.

2.4 Siebdrucktechnik

Siebdruck ist ein industriell etabliertes und zuverlässiges Verfahren, um die elektrischen Kontakte einer Solarzelle aufzubringen. Ein Gummirakel drückt eine viskoelastische Paste, die sich unter Scherspannung verflüssigt, durch ein Sieb. Das Sieb besteht aus einem Metallgewebe, das flach in einen Rahmen eingespannt ist. Dieses Gewebe ist mit einer Kunststoffschicht gefüllt, Emulsion genannt. Durch photolithographische Methoden wird die Emulsion in der Form des Druckbildes herausgelöst. Es entsteht eine Öffnung in der Emulsion, durch die das Druckrakel die Paste auf den Wafer drücken kann. Durch die Dicke der Drähte im Gewebe ist die kleinste Fingerbreite auf 80 - 100 μm limitiert [18, 68]. Die möglichen Fingerhöhen werden von der Pastenrheologie, der Dicke der Emulsion und in geringerem Maß von weiteren Parametern (z. B. Absprung und Rakeldruck) bestimmt und liegen zwischen 5 - 15 μm für Silberpasten und zwischen 20 - 40 μm bei Aluminiumpasten (Dektakmessungen). Unebenheiten in der Waferoberfläche führen dazu, daß das Sieb nicht völlig plan anliegt. Der entstehende Zwischenraum kann sich aufgrund von Kapillareffekten mit Paste füllen, die Finger werden dann breiter oder verschmieren. Werden ineinander verschachtelte Finger gedruckt, erzeugt das erste Grid ebenfalls solch eine Unebenheit beim Druck des zweiten Grids (Fig. 30).

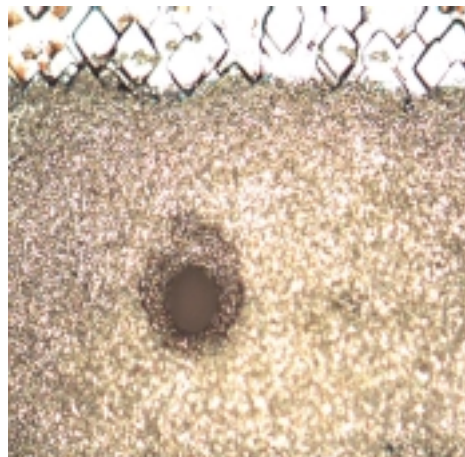


Fig. 30: Ausschnitt eines Emitterfingers nach dem Feuern. Der Rand des Fingers verläuft ausgefranst, einzelne Pastenpartikel finden sich noch bis zu 100 μm vom Fingerrand entfernt.

Ein vergleichbarer Effekt wird durch das Vakuum verursacht, das den Wafer am Drucktisch festhält: Durch die Verbindungslöcher im Wafer wird Paste auf die Wafervorderseite gesaugt und verschmiert dort.

Die beiden ineinander verschachtelten Grids erfordern eine genaue Justierung von Sieb und Wafer beim Drucken. Anfangs stand nur ein Siebdrucker ohne optische Justiereinrichtung zur Verfügung. Für eine Übergangszeit konnte ein neuer Siebdrucker mit optischer Mustererkennung genutzt werden. Die Mustererkennung wurde dann in eine Kantenerkennung umgebaut. Ab diesem Zeitpunkt wurde für alle Siebdruckschritte der halbautomatische Siebdrucker mit optischem Justiersystem verwendet (Fig. 31). In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma wurde die optische Bildererkennung auf die Justierung der Waferkanten optimiert. Die Justierung zwischen Wafer und Drucksieb erfolgt

computergesteuert anhand von drei CCD-Kameras, die genauso angeordnet sind wie die Anschlagstifte des Lasers in Fig. 15.

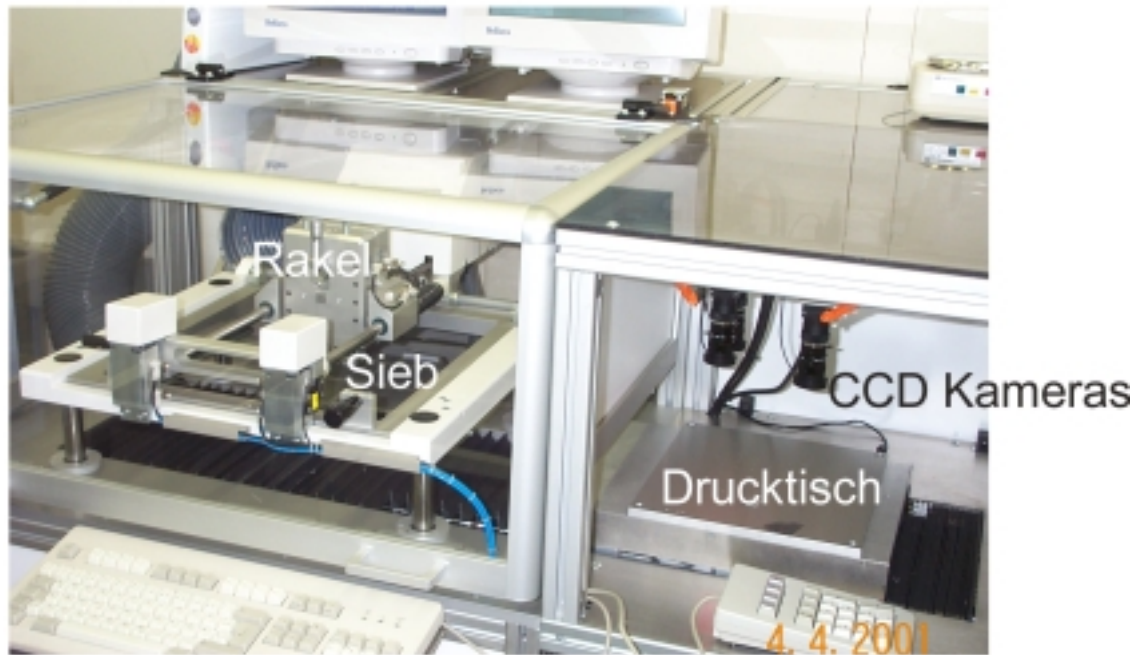


Fig. 31: Siebdrucker mit optischem Justiersystem. In der rechten Hälfte erfolgt die Waferkantenerkennung über drei CCD Kameras. Die Justierung kann über einen Bildschirm kontrolliert und wenn nötig auch korrigiert werden. Nachdem der Wafer korrekt ausgerichtet ist, fährt der Drucktisch unter das Sieb in der linken Hälfte der Maschine, und der Wafer wird dort bedruckt.

Anhand von Justiermarken, die in das Bild der CCD-Kameras eingeblendet sind, werden die Waferkanten entweder manuell oder auch vollautomatisch auf das Druckbild im Sieb ausgerichtet. Um auch Kanten multikristalliner Wafer mit Korngrenzen und unterschiedlichen Reflexionseigenschaften sicher erkennen zu können, ist der Drucktisch durchsichtig und der Wafer wird von unten, durch den Drucktisch hindurch, beleuchtet.

Sind Druckbild und Waferkante einmal aufeinander justiert, können nahezu beliebig viele Wafer bedruckt werden. Die Siebe unterliegen allerdings einem Alterungsprozeß, der sich durch Vergrößerung der Fingerabstände äußert. Diesem Alterungsprozeß kann z. B. durch Verwenden von Schablonen anstatt der Drucksiebe begegnet werden (vgl. z. B. [69]).

2.5 Metallisierungspasten

Für den Druck der Kontakte stehen mehrere Metallisierungspasten zur Verfügung. In dieser Untersuchung wurden allerdings nur drei verschiedene Pasten verwendet. Für den Emitterkontakt wurde eine reine Silberpaste benutzt. Diese Paste ist für die Frontkontakte herkömmlicher Zellen optimiert, daher ist die Linienverbreiterung gering.

Um einen guten Kontakt zum p-leitenden Silizium zu erzielen, muß in der Paste für den Basiskontakt Aluminium enthalten sein. Dieses dient außerdem dazu, die n^+ -Schicht im Bereich der Basis überzukompensieren, wenn der Wafer auf beiden Seiten diffundiert wurde. Paste A (Ag/Al) enthält 2 % Aluminium und einen großen Anteil Silber. Der Silberanteil erhöht die elektrische Leitfähigkeit, außerdem läßt sich das Grid nach dem Feuern verlöten.

Paste B (Al) enthält dagegen hauptsächlich Aluminium. Die geringere spezifische Leitfähigkeit wird dadurch ausgeglichen, daß die Schichtdicke aufgrund anderer Rheologie mehr als doppelt so groß ist wie bei Paste A. Aufgrund dieser höheren Schichtdicke verbreitern sich Finger aus Paste B um bis zu 300 µm.

Bei herkömmlichen Zellen mit ganzflächiger Rückseitenmetallisierung erzeugt Paste B ein sehr gutes BSF. Bei einem Fingergrid wie es für EWT-Zellen verwendet wird, ist der Effekt des BSF jedoch gering bis nicht nachweisbar, näheres dazu in Kapitel 4.5.1. Versuche, erst Paste B zu drucken, um ein gutes BSF und einen niedrigen Kontaktwiderstand zu erzielen, und darüber Paste A (oder reine Silberpaste) führten zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Die beiden Pasten für den Basiskontakt sind von der Herstellerfirma nicht für Fingerkontakte optimiert. Die Verbreiterung der Finger von 50 % - 70 % mußte deshalb bei der Siebgeometrie mitberücksichtigt werden. In Fig. 32 und Fig. 33 ist die metallisierte Rückseite zweier EWT-Zellen gezeigt, um einen Eindruck der beim Siebdruck erzielten Justiergenauigkeit zu gewinnen. Fig. 34 zeigt die Metallisierung innerhalb der Verbindungslöcher: Selbst in unmittelbar nach dem Druck vollständig mit Paste gefüllten Löchern reicht die Metallisierung nach dem Feuern nur bis zur Hälfte.

Der Prozeß der Metallisierung verläuft in der Regel so, daß nach dem Druck des Emittergrids die Paste im Trockenofen bei etwa 200 °C einige Minuten lang getrocknet wird. Sodann wird das Basisgrid aufgedruckt und getrocknet. Anschließend werden beide Grids in einem gemeinsamen Co-Feuerprozeß im Durchlaufgürtelofen bei Temperaturen zwischen 800 °C und 900 °C gefeuert, wobei sich der elektrische Kontakt zwischen Silizium und Metallisierungspaste ausbildet [19]. Wird der Basiskontakt auf eine Maskierschicht (Diffusionsbarriere) gedruckt, so wird er vor dem Emitterkontakt aufgedruckt, getrocknet und bei höherer Temperatur durch die Maskierschicht gefeuert. Einfacher ist jedoch die erste Variante.

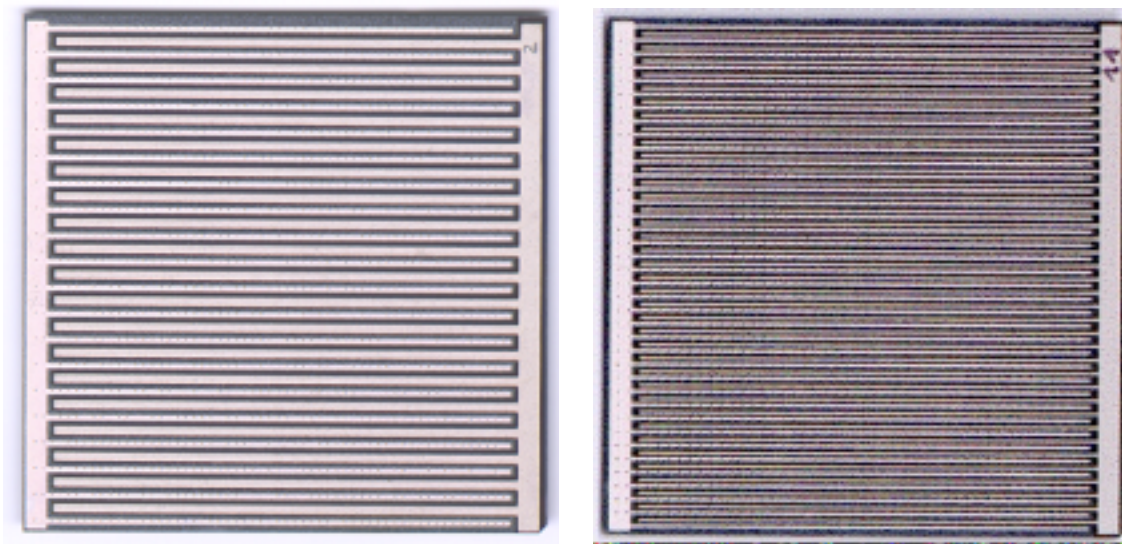


Fig. 32: Rückseite einer 5 x 5 cm² EWT-Zelle, links der Emitterbusbar und rechts der Basisbusbar. Linkes Bild 2,5 mm Fingerabstand, rechtes Bild 1,3 mm Fingerabstand. Die Justierung erfolgte über automatische Mustererkennung.

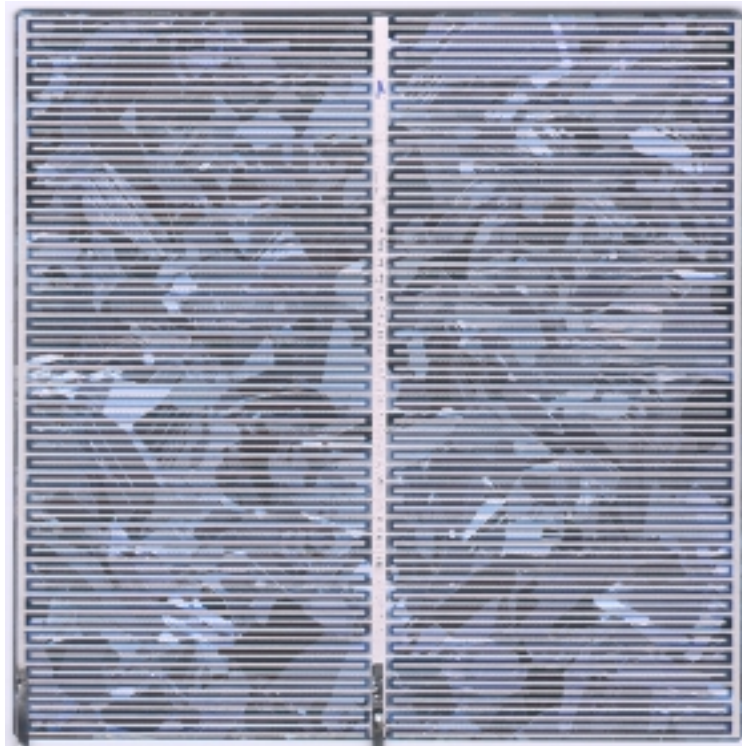


Fig. 33: Rückseite einer multikristallinen 10 x 10 cm² EWT-Zelle: In der Mitte der Emitterbusbar, rechts und links die Basisbusbars (2,4 mm Fingerabstand). Die Justierung erfolgte mittels automatischer Kantenerkennung. Die Metallisierung des Emitterbusbars (Mitte) ist nicht ganz vollständig: Der verwendete Plexiglastisch hat sich beim Druck durchgebogen und dadurch vom Drucksieb entfernt [70].

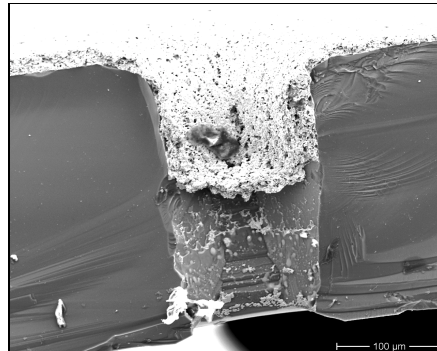
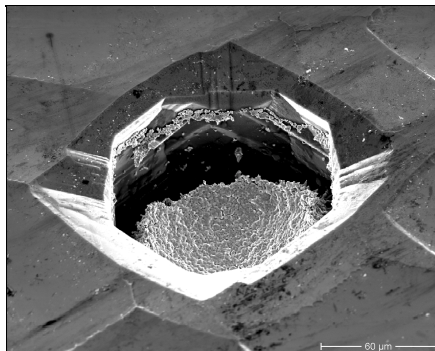


Fig. 34: Metallisierung innerhalb der Verbindungslöcher: Durch den Volumenverlust der Paste beim Feuern (Verdampfen der organischen Bestandteile) sind die Löcher am Prozeßende nur zu 25 - 30 % mit Paste gefüllt (SEM Bilder).

2.6 Emitterdiffusion

2.6.1 Gasphasendiffusion

Bei der Gasphasendiffusion strömt Stickstoff als Trägergas durch ein mit flüssiger POCl_3 gefülltes Vorratsgefäß (Bubbler) und wird anschließend zusammen mit Sauerstoff in das Diffusionsrohr eingeleitet. Bei ca. 850 °C reagiert POCl_3 mit O_2 zu Phosphorpentoxid (P_2O_5) und Chlor (Cl_2). Auf dem Siliziumwafer bildet sich dabei eine Siliziumoxidschicht, in die zahlreiche Phosphoratome eingebaut sind, das sog. Phosphorglas (Phosphorsilikatglas). Aus

dem Phosphorglas diffundieren die Phosphoratome in den Wafer und bilden dort den Emitter mit einem von Diffusionszeit und -temperatur abhängigen charakteristischen Dotierprofil [71].

Nach der Diffusion wird das Phosphorglas mit verdünnter Flußsäure entfernt. Durch eine Schichtwiderstandsmessung (Vierpunktmessung [72]) kann überprüft werden, ob die Diffusion wie gewünscht verlief. Um das Dotierprofil zu bestimmen, müßten dagegen aufwendige Methoden wie Stripping-Hall oder SIMS [73] angewendet werden. Die Verbindungslöcher in EWT-Zellen verfälschen die Schichtwiderstandsmessung, so daß bei jeder Diffusion immer auch Wafer ohne Löcher mitgeführt wurden.

2.6.2 Pasten zur Emitterdiffusion

Statt Gasphasendiffusion (POCl_3) besteht auch die Möglichkeit, mittels Siebdruck eine phosphorhaltige Paste aufzudrucken und im Gürtelofen einzudiffundieren [74]. Für Optimierungsuntersuchungen des Schichtwiderstands ist diese Methode sehr geeignet, da – im Gegensatz zum Batch-Prozeß im POCl_3 -Ofen – für einzelne Wafer eigene Diffusionsparameter (Diffusionszeit und -temperatur) gewählt werden können.

2.6.3 Feststoffdiffusion

Versuchsweise wurde zur Diffusion im Gürtelofen ein phosphorhaltiges Papier verwendet. Laut Hersteller dieser Diffusionsquelle sollte es mit diesem Papier möglich sein, einen ganzen Stapel Wafer gleichzeitig zu diffundieren und den Diffusionsprozeß so zu beschleunigen. Das Ergebnis der Untersuchung war jedoch unbefriedigend: Entgegen den Herstellerangaben hafteten Rückstände des Diffusionspapiers an den Wafern, die erzielbaren Schichtwiderstände lagen weit über $120 \Omega/\text{sqr}$ und wiesen eine große Streuung auf.

2.6.4 Zwei-Stufen-Emitter

Für hohe Quantenausbeute im Spektralbereich von 350 - 600 nm ist ein schwach dotierter flacher Emitter (Schichtwiderstand 80 - $120 \Omega/\text{sqr}$, Oberflächenkonzentration ca. 10^{19} cm^{-3}) mit einer guten Oberflächenpassivierung ($S_f < 10^4 \text{ cm/s}$) nötig. (Die Betrachtung des Schichtwiderstands ist eine Vereinfachung, da eigentlich das Dotierprofil – Oberflächenkonzentration und Dicke des Emitters – für die Quantenausbeute entscheidend sind. Jedoch genügen die untersuchten Emitter dieser vereinfachten Beschreibung). Um den Kontaktwiderstand gering zu halten und um speziell bei siebgedruckten Kontakten Kurzschlußbildung zu verhindern, muß die Emitterschicht unter den Kontakten stark dotiert sein. Bei herkömmlichen Zellen wird gewöhnlich so diffundiert, daß ein Schichtwiderstand von 30 - $35 \Omega/\text{sqr}$ (Oberflächenkonzentration ca. 10^{21} cm^{-3} , Sättigung) erreicht wird. Die Entwicklung neuer Metallisierungspasten ermöglicht inzwischen – jedenfalls im Labormaßstab – auch die Kontaktierung von 50 - $60 \Omega/\text{sqr}$ Emittern.

Um auch bei siebgedruckten Solarzellen eine hohe Quantenausbeute im kurzwelligen Teil des Spektrum zu erzielen, wird ein Zwei-Stufen-Emitter verwendet – mit hoher Dotierung unter den Kontakten und schwacher Dotierung zwischen den Fingern. Wird der Unterschied in der Dotierkonzentration durch zwei verschiedene Diffusionsschritte erzielt, muß eine geeignete Maskierschicht verwendet werden, um den zuerst diffundierten schwachdotierten Emitter

während der folgenden starken Diffusion zu schützen [75]. Bei konventionellen Zellen ist zusätzlich ein Justierschritt notwendig, damit die anschließend aufgedruckten Kontakte genau auf die stark dotierten Bereiche gedruckt werden (Gefahr der Kurzschlußbildung).

EWT-Zellen haben den Vorteil, daß die lichteinsammelnden Emitterbereiche (Vorderseite) und die kontakttragenden Emitterbereiche (Rückseite) räumlich getrennt sind, so daß für einen selektiven Emitter kein zusätzlicher Justierschritt notwendig ist (Fig. 35). Gleichzeitig mit dem Rückseitenemitter wird bei EWT-Zellen auch der Emitter in den Verbindungslöchern diffundiert. Da bei siebgedruckten EWT-Zellen die Leitfähigkeit der Verbindungslöcher hauptsächlich durch den Emitterschichtwiderstand bestimmt wird, kann durch den Zwei-Stufen-Emitter der Serienwiderstandsbeitrag der Verbindungslöcher deutlich gesenkt werden (siehe Kapitel 5.2.2).

Während der zweiten Diffusion diffundiert Phosphor etwa 30 nm weit in die Siliziumnitridschicht, die den Frontemitter schützt, ein. Beim Entfernen des Phosphorglases in verdünnter Flußsäure löst sich diese stark phosphordotierte SiN-Schicht ab. Diese Verringerung der Schichtdicke muß folglich beim Abscheiden der SiN-Schicht mitberücksichtigt werden.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit BP Solar im ACE-Designs-Projekt wurden von BP Solar in Madrid teilprozessierte Wafer zu EWT-Zellen weiterprozessiert. Bei BP Solar wurden die Cz-Wafer alkalisch texturiert, auf der Frontseite wurde ein hochohmiger Emitter eindiffundiert, der anschließend mit einem dicken LPCVD Siliziumnitrid (110 nm) geschützt wurde. Multikristalline Wafer wurden zuerst mechanisch walzentexturiert, bevor anschließend bei BP Solar der Frontemitter diffundiert und LPCVD Siliziumnitrid abgeschieden wurde.

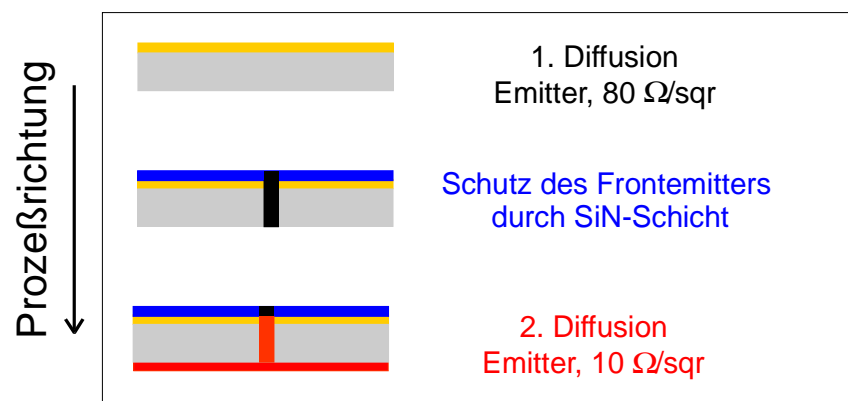


Fig. 35: Schema eines selektiven Emitters. Auf der Zellvorderseite wird ein schwach dotierter flacher Emitter diffundiert, um Auger-Rekombination gering zu halten und Rekombination in der Dead-Layer zu vermeiden [71]. Für eine hohe Quantenausbeute im Spektralbereich von 350 - 600 nm ist zusätzlich eine gute Oberflächenpassivierung nötig (Siliziumnitrid). Auf der Zellrückseite und in den Löchern wird stark n^+ -dotiert um gute Leitfähigkeit und einen kleinen Kontaktwiderstand zu erreichen.

2.7 Antireflexschicht und Fronttextur

Für einen hohen Wirkungsgrad ist es wichtig, daß das auf die Zelle auftreffende Licht möglichst vollständig in den Wafer gelangt. Die Reflexion an der Frontseite wird durch Aufbringen von ein oder zwei dünnen Schichten aus Siliziumnitrid oder -oxid (Anti-

Reflective-Coating ARC bzw. Double-layer-Anti-Reflective-Coating DARC) verringert. Durch Texturierung der Oberfläche (Pyramiden oder V-Gräben) mit typischen Abmessungen im Bereich einiger Mikrometer läßt sich der Lichteinfall durch schräge Einkopplung und Mehrfachreflexion im Wafer noch erhöhen [50, 52, 54, 76, 77].

Bei der Frontseitentexturierung von EWT-Zellen brauchen keinerlei Einschränkungen für den Druck der Kontaktfinger berücksichtigt zu werden: Anders als bei konventionellen Zellen sind keine untexturierten Bereiche (Stege oder Plateaus) für die Kontaktfinger nötig.

Anstatt der hier beschriebenen alkalischen Texturierung für monokristallines Silizium und mechanischen Texturierung für multikristallines Silizium könnte auch eine Texturierung mittels Plasmaätzen [55, 78-80] oder mittels einer speziellen sauren Ätzlösung [81, 82] vorgenommen werden. Jüngste Untersuchungen nutzen erfolgreich Laser zur Mikrotextrurierung von multikristallinen Wafern [83].

2.7.1 Antireflexschicht

Als Antireflexschicht wird eine dünne, ca. 80 nm dicke Siliziumnitridschicht mit Brechungsindex $n \approx 2,1$ auf der Zellfrontseite abgeschieden. Die Schicht besteht aus PECVD oder LPCVD Siliziumnitrid. LPCVD Siliziumnitrid ist etwas dichter und widersteht hohen Temperaturen (1000 °C), außerdem eignet sich LPCVD SiN gut zur Oberflächenpassivierung mit $S_f \approx 3000 \text{ cm/s}$ [84]. LPCVD SiN enthält kaum Wasserstoff und trägt deshalb wenig zur Bulkpassivierung von multikristallinem Silizium bei [85]. LPCVD SiN bedeckt in der Regel Vorder- und Rückseite eines Wafers. Durch „back-to-back“ Anordnung der Wafer kann die Abscheidung auf einer Seite verringert, aber nicht ganz vermieden werden. Meist folgt daher noch ein Plasmaätzschritt nach, um Siliziumnitridreste auf der Rückseite zu entfernen.

PECVD Siliziumnitrid enthält bei geeignet gewählter Zusammensetzung viel Wasserstoff [86]. Wird die PECVD Siliziumnitridschicht vor dem Feuern der Kontakte aufgebracht, kann der Wasserstoff vor allem bei multikristallinem Silizium zur Bulkpassivierung beitragen [86-89]. PECVD SiN wird in der Regel auf hochdotierte Emitter ($< 50 \Omega/\text{sqr}$) abgeschieden, so daß die Oberflächenpassivierung von untergeordneter Bedeutung ist [75] (neue Untersuchungen zeigen, daß auch mit PECVD SiN bei geeigneter Zusammensetzung sehr gute Passivierung sowohl von n- als auch von p-leitenden Oberflächen erzielt werden kann [90]). PECVD SiN wird im Gegensatz zu LPCVD SiN nur einseitig abgeschieden.

Aus dem Minimum der Reflexionskurve läßt sich nach $d = \lambda_{\text{min}}/(4n)$ die Dicke d der SiN-Schicht bestimmen [91]. Je nach IQE der Zelle sollte sich das Reflexionsminimum ungefähr bei 600 nm befinden, was einer Schichtdicke von etwa 75 nm entspricht.

2.7.2 Alkalische Texturierung

Eine kostengünstige Möglichkeit die Oberfläche von monokristallinem Silizium mit Zufallspyramiden (random pyramids, Fig. 36) zu versehen, ist ein alkalisches Ätzbad (NaOH oder KOH mit Wasser und Isopropanol) [91]. Dabei wird die anisotrope Ätzrate von Silizium in alkalischen Ätzbädern genutzt: Die Ätzrate in der Kristallrichtung $\langle 111 \rangle$ ist um ein bis zwei Größenordnungen kleiner die in $\langle 100 \rangle$ Richtung. Nicht vollständig geklärt ist dabei wie Isopropanol die Entstehung der Mikropyramiden verursacht. Wird zusätzlich zur

Mikrotexturierung eine ARC aus Siliziumnitrid abgeschieden, erreicht man eine gewichtete Restreflexion von unter 4 % (vgl. Kapitel 4.5.2).

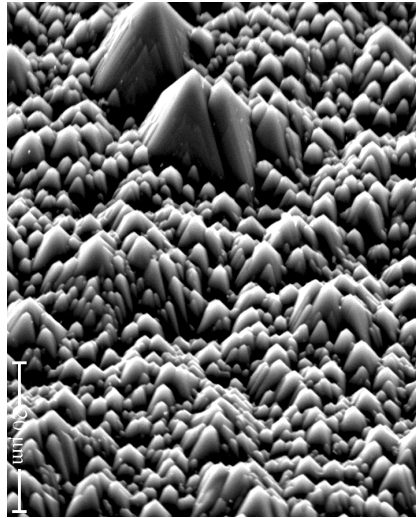


Fig. 36: SEM Bild von Zufallspyramiden [92]. Die Kantenlänge der Pyramiden beträgt wenige Mikrometer.

2.7.3 Mechanische Texturierung

Multikristallines Silizium läßt sich nicht effizient alkalisch texturieren, weil die Kristallite nicht alle in $\langle 100 \rangle$ Richtung orientiert sind. In [76] findet sich der Vorschlag die Oberfläche mittels eines V-förmigen Sägeblattes zu texturieren. Um den Durchsatz zu erhöhen, kann auch eine passende Walze eingesetzt werden (Fig. 37) [52]. Die Restreflexion (5 - 6%) von V-texturierten Wafern mit ARC ist nur unwesentlich höher als die durch alkalisches Ätzen erzeugte, jedoch leidet die mechanische Stabilität der Wafer aufgrund der starken mechanischen Scherkräfte, die beim Texturieren auf den Wafer einwirken [19].

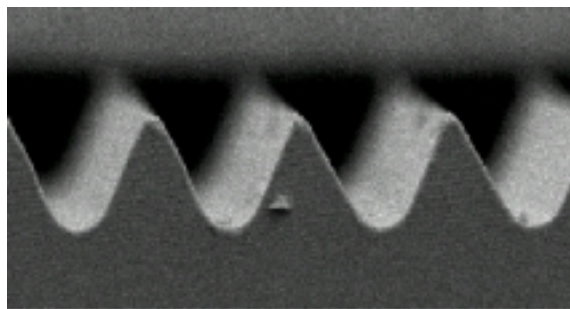


Fig. 37: SEM Bild einer walzertexturierten Waferoberfläche. Der Abstand der V-Gräben beträgt 200 μm , der Grabenwinkel ist 70° [93].

3. Kapitel - Charakterisierung von EWT-Zellen

Die Charakterisierung von Solarzellen dient einerseits der Erfolgskontrolle soweit sie den Wirkungsgrad betrifft. Andererseits ermöglicht eine ausführliche Charakterisierung auch, die Ursachen für weniger gute Wirkungsgrade ausfindig zu machen und so die Richtung für Verbesserungen und Optimierung vorzugeben. Hauptbestandteil der Charakterisierung ist die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie (IV-Kennlinie), die sowohl mit als auch ohne Beleuchtung durchgeführt wird (Hell- bzw. Dunkelkennlinie). Aus der Hellkennlinie wird der Wirkungsgrad der Zelle bestimmt. Durch gemeinsame Auswertung von Hell- und Dunkelkennlinie lassen sich Rückschlüsse auf Serienwiderstand (R_{serie}) und Sperrsättigungsströme (J_{01} und J_{02}) ziehen.

Eine weitere Charakterisierungsmethode ist die Messung der spektralen Empfindlichkeit (Spectral Response, SR) der Zelle, mittels der sich Diffusionslänge und Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten berechnen lassen. IV-Messung und spektrale Empfindlichkeit stellen eine Mittelung über die ganze Zelle dar. Ist die Zelle nicht homogen, lassen sich vorteilhaft ortsaufgelöste Meßmethoden einsetzen: LBIC-Messungen erlauben eine lokale Messung des Kurzschlußstromes und thermographische Aufnahmen ermöglichen die Lokalisierung von Kurzschlüssen und von Bereichen erhöhter Rekombination.

3.1 IV-Messung

Die IV-Messung gliedert sich in drei Teile:

- Hellmessung unter AM1.5 Beleuchtung
- Dunkelmessung
- Messung bei kontinuierlicher Lichtabnahme, bei der Wertepaare aus Kurzschlußstrom (I_{sc}) und offener Klemmspannung (V_{oc}) aufgezeichnet werden.

Die Zellparameter sind temperaturabhängig (z. B. $V_{oc} \approx -1,7 \text{ mV/K}$ [94]), die Zelle muß deshalb – speziell bei der Hellmessung – temperaturstabilisiert werden. Dies ist für herkömmliche Zellen einfach, da der ganzflächige Basiskontakt plan am temperaturstabilisierten Messingmeßtisch anliegt. Bei Rückkontaktzellen muß auf elektrische Isolation zwischen Meßtisch und Kontakten geachtet werden, wegen des Fingergrids ist die Wärmeübertragung geringer. Da die Zellrückseite nicht ganzflächig metallisiert ist, beeinflusst die Reflexion des Meßtisches die IV-Messung. Zur Messung von EWT-Zellen wurde daher ein eigener, geschwärzter Messingmeßtisch entworfen, wobei ein eingebauter Temperaturfühler direkt die Temperatur der Zelle mißt und die Kühlung des Meßtisches entsprechend nachgeregelt werden kann.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle gibt das Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zu eingestrahelter Lichtleistung an. Die eingestrahelte Lichtleistung ist per Konvention auf 1000 W/m^2 festgelegt. Die von der Solarzelle abgegebene maximale elektrische Leistung bestimmt sich aus dem Produkt von Spannung und Stromdichte am optimalen Arbeitspunkt (Maximum Power Point, mpp) oder gleichbedeutend als Produkt von Leerlaufspannung V_{oc} , Kurzschlußstromdichte J_{sc} und Füllfaktor FF .

Für die Auswertung der IV-Kennlinien wurde angenommen, daß das Zwei-Dioden-Modell (Gleichung 3-1) trotz der dreidimensionalen Struktur von EWT-Zellen gültig sei. Die Herleitung des Modells ist in [26, 95] beschrieben; im Anhang findet sich eine Erklärung aller verwendeten Größen und Symbole. Die Parameter R_{serie} , R_{shunt} , I_{01} und I_{02} in Gleichung 3-1 können dadurch bestimmt werden, daß mittels eines Fitprogrammes bestmögliche Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der berechneten Kurve erzielt wird ($n_1 = 1$ und $n_2 = 2$).

$$\text{Gleichung 3-1 } I(U) = I_{01} \left[\exp \frac{U - I \cdot R_{serie}}{n_1 \cdot U_T} - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \frac{U - I \cdot R_{serie}}{n_2 \cdot U_T} - 1 \right] + \frac{U - I \cdot R_{serie}}{R_{shunt}} - I_L$$

Genauer als aus der Hellkennlinie läßt sich der Wert von R_{shunt} aus der Dunkelkennlinie ($I_L = 0$) in der Umgebung von $U = 0$ – wegen $I(U \approx 0) = U/R_{shunt}$ – bestimmen.

$$\text{Gleichung 3-2 } I_{sc}(V_{oc}) = I_{01} \left[\exp \frac{V_{oc}}{n_1 \cdot U_T} - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \frac{V_{oc}}{n_2 \cdot U_T} - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{shunt}}$$

Die $V_{oc}J_{sc}$ -Kennlinie (Gleichung 3-2) wird bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten bestimmt. Sie ist von R_{serie} unbeeinflusst, deshalb werden aus ihr I_{01} und I_{02} entnommen [96]. Der Serienwiderstand schließlich läßt sich am besten aus der Hellkennlinie bestimmen. Eine Erweiterung des Zwei-Dioden-Modells läßt auch verteilte Serienwiderstände [96-98] zu, dies wird im Auswerteprogramm [99] durch einen prozentualen Anteil am Gesamtserienwiderstand angegeben.

Die zu erwartende offene Klemmspannung läßt sich numerisch berechnen, wenn I_{01} , I_{02} und der Shuntwiderstand bekannt sind [99].

Näherungsweise ergibt sich die Leerlaufspannung unter Vernachlässigung des Rekombinationsstroms aus der Raumladungszone aus Kurzschlußstrom und I_{01} nach Gleichung 3-3 [2]. Da der Rekombinationsstrom aus dem pn-Übergang die Leerlaufspannung von Zellen mit verschachteltem Fingergrid in besonderem Ausmaß verringert, ist die Anwendbarkeit dieser Näherung sehr eingeschränkt (vgl. I_{02} in Kapitel 5.1.3).

$$\text{Gleichung 3-3 } V_{oc} \approx U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{01}} \right)$$

I_{02} entsteht durch Rekombination im pn-Übergang (gleiche Konzentration Akzeptoren und Donatoren) und war lange Zeit limitierend für V_{oc} vieler Rückkontaktzellen (siehe auch Kapitel 5.1.3, [7, 11, 16, 44, 100]). Bei der Herleitung von I_{02} ergibt sich eine Abhängigkeit

von der Raumladungszonenbreite und der Ladungsträgerlebensdauer (Elektronen und Löcher) in der Raumladungszone [26].

I_{01} kann als Summe verschiedener Rekombinationsströme betrachtet werden: Die drei Hauptanteile dabei sind Rekombination in der Basis, an der Basisoberfläche und im Emitter. In die Berechnung geht die Minoritätsladungsträgerlebensdauer in Basis und Emitter ein, außerdem die Diffusionskonstante D und die Ladungsträgerkonzentration in Basis und Emitter. I_{01} hängt umgekehrt proportional mit einer effektiven Diffusionslänge L_{eff} zusammen (Gleichung 3-4).

$$\text{Gleichung 3-4} \quad I_{01} = \frac{qDn_i^2}{N_b L_{eff}} \quad [101]$$

Das Zwei-Dioden-Modell setzt elektrische Homogenität der Zelle in zwei Raumrichtungen voraus, die bei EWT-Zellen nur unvollständig gegeben ist. Auch bleiben manche Effekte wie z. B. spannungsabhängige Shuntwiderstände im Zwei-Dioden-Modell unberücksichtigt. Jedoch ist die Auswertung einfach anzuwenden; das Modell ist sehr praktisch, um Zellen untereinander zu vergleichen und Schwachpunkte einzugrenzen. Die nach dem Zwei-Dioden-Modell berechneten IV-Kurven stimmen in der Regel gut mit den an EWT-Zellen gemessenen überein, so daß das Modell durchaus seine Berechtigung bei der Anwendung auf EWT-Zellen hat.

3.2 Interne Quantenausbeute

Bei der Messung der spektralen Empfindlichkeit wird der Kurzschlußstrom der Zelle unter monochromatischer Beleuchtung für 20 oder mehr verschiedene Wellenlängen bestimmt. Die Messung wird mittels einer geeichten Referenzzelle kalibriert. Um aus diesem Kurzschlußstrom die interne Quantenausbeute (IQE) zu bestimmen, muß zusätzlich die Reflexion R der Zellvorderseite heraus- und Abweichungen der Beleuchtungsintensität gegenüber dem Sonnenspektrum hereingerechnet werden (Gleichung 3-5). Statt des Kurzschlußstroms gibt die interne Quantenausbeute den Bruchteil der Ladungsträger an, die von den in die Zelle eingedrungenen Photonen generiert werden und die ohne zu rekombinieren zum gemessenen Strom beitragen.

$$\text{Gleichung 3-5} \quad IQE = SR \frac{hc/q\lambda}{1-R}$$

Die EQE (externe Quantenausbeute) ist der Anteil von Ladungsträgern der durch auf die Zelle auftreffende Photonen generiert wird ($IQE = EQE/(1 - \text{Reflexion})$), daraus kann die Kurzschlußstromdichte bei Beleuchtung im Wellenlängenintervall λ_{min} bis λ_{max} berechnet werden (F_{in} eingestrahlte Lichtleistung) [102].

$$\text{Gleichung 3-6} \quad J_{sc}^{EQE} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} q \cdot F_{in}(\lambda) \cdot EQE(\lambda) \cdot d\lambda$$

Aus der IQE lassen sich Rückschlüsse auf die Diffusionslänge L der Minoritätsladungsträger im Bulk, auf die Qualität des Emitters, und auch auf die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten (ORG oder SRV für Surface Recombination Velocity) S von Vorder- und Rückseite der Zelle ziehen. Für die Auswertung wird die zwischen 800 nm und 1000 nm stark wellenlängenabhängige Absorptionslänge α^{-1} von Silizium genutzt (Gleichung 3-7). Die Voraussetzungen für diese Berechnung nach Basore [103] sind für konventionelle siebgedruckte Zellen recht gut erfüllt [104, 105], die Anwendbarkeit für Zellen mit Rückseitenemitter ist jedoch sehr fragwürdig.

Gleichung 3-7
$$IQE^{-1}(\lambda) = 1 + \frac{\cos \theta_1}{\alpha(\lambda)L_{eff}}$$

Wird $IQE^{-1}(\lambda)$ über α^{-1} (tabellierte Werte) aufgetragen, läßt sich aus Gleichung 3-7 L_{eff} als Steigung bestimmen, mit θ_1 dem Eindringwinkel ($\theta_1 = 0^\circ$ für plane Oberflächen, $\theta_1 = 41^\circ$ für alkalisch texturierte, unabhängig von der ARC) und mit α der reziproken Absorptionslänge. Es ist wichtig zu bemerken, daß L_{eff} aus Gleichung 3-4 nur dann mit L_{eff} aus Gleichung 3-7 übereinstimmt, wenn die Zelle vollkommen homogen ist. Variiert L_{eff} über die Zelle so gilt $L_{eff}^{IV} < L_{eff}^{IQE}$ [101]. L_{eff} wiederum zerfällt in einen Anteil L und S nach Gleichung 3-8 mit Diffusionskonstante D und der Waferdicke W .

Gleichung 3-8
$$L_{eff} = L \frac{1 + \frac{SL}{D} \tanh \frac{W}{L}}{\frac{SL}{D} + \tanh \frac{W}{L}}$$

Auflösen nach S ergibt Gleichung 3-9:

Gleichung 3-9
$$S = \frac{L - L_{eff} \tanh \frac{W}{L}}{LL_{eff} - L_{eff}^2 \tanh \frac{W}{L}}$$

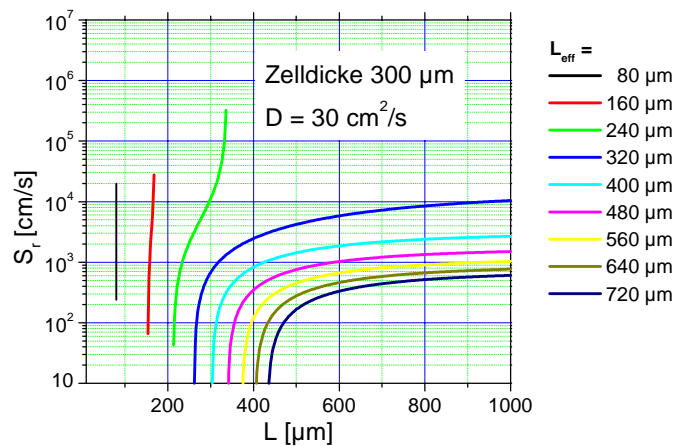


Fig. 38: Verschiedene Wertepaare von S und L liefern dasselbe L_{eff} . Für $L \ll W$ wird $L_{eff} \approx L$, da dann S keinen Einfluß mehr auf L_{eff} hat.

Für S und L lassen sich bei Beleuchtung von der Vorderseite in der Regel nur asymptotische Schranken angeben, siehe Fig. 38.

Bei Solarzellen, deren Rückseite nicht ganzflächig mit Metall bedeckt ist, kann auch die spektrale Empfindlichkeit bei Beleuchtung der Rückseite gemessen werden. Aus der Rückseiten-IQE (IQE_r) lassen sich S und L getrennt auswerten und genauer bestimmen als aus der Vorderseiten IQE (Gleichung 3-10) [106].

Gleichung 3-10
$$IQE_r(S, L) = \frac{1 + \frac{S}{D\alpha}}{\cosh\left(\frac{W}{L}\right) + \frac{SL}{D} \sinh\frac{W}{L}}$$

Auftragen von IQE_r (Meßwerte) über α^{-1} ergibt wieder eine Gerade, deren Steigung m geteilt durch den Achsenabschnitt c gerade S/D ergibt. Aus Steigung oder Achsenabschnitt kann durch numerisches Lösen einer transzendenten Gleichung (Gleichung 3-11 oder Gleichung 3-12) L berechnet werden (siehe auch Fig. 39).

Gleichung 3-11
$$c = \frac{1}{\cosh\frac{W}{L} + \frac{S}{D} L \sinh\frac{W}{L}}$$

Gleichung 3-12
$$m = \frac{S}{D * \left(\cosh\frac{W}{L} + \frac{S}{D} L \sinh\frac{W}{L} \right)}$$

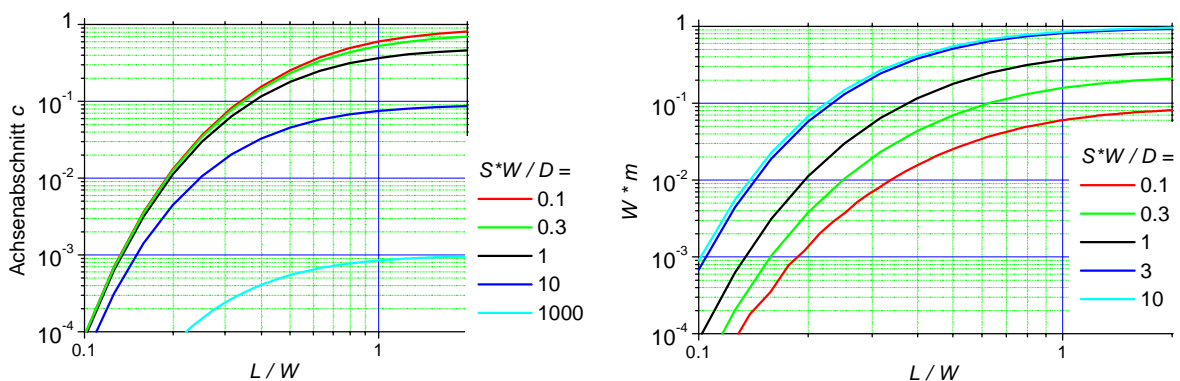


Fig. 39: Dimensionslose Auftragung der beiden transzendenten Gleichungen mit verschiedenen Werten $S*W/D$ als Parameter. S groß beeinflusst den Achsenabschnitt c aber nicht die Steigung m . Kleine S werden in $W*m$ unterscheidbar (rechte Grafik) [106].

Der Aufbau der Anlage für die Messung der spektralen Empfindlichkeit und der Reflexion ist in [107] beschrieben. Die Reflexion der Zelle wird mittels einer Ulbrichtkugel in einem Spektrometer wellenlängenabhängig gemessen.

3.3 LBIC Messungen

Light Beam Induced Current (LBIC) Messungen beruhen auf einer Kurzschlußstrommessung der Zelle, wobei nur ein winziger Bruchteil der Zellfläche mit einem pulsierenden (Lock-In-Technik) Laserstrahl (monochromatisch) beleuchtet wird (Fig. 40).

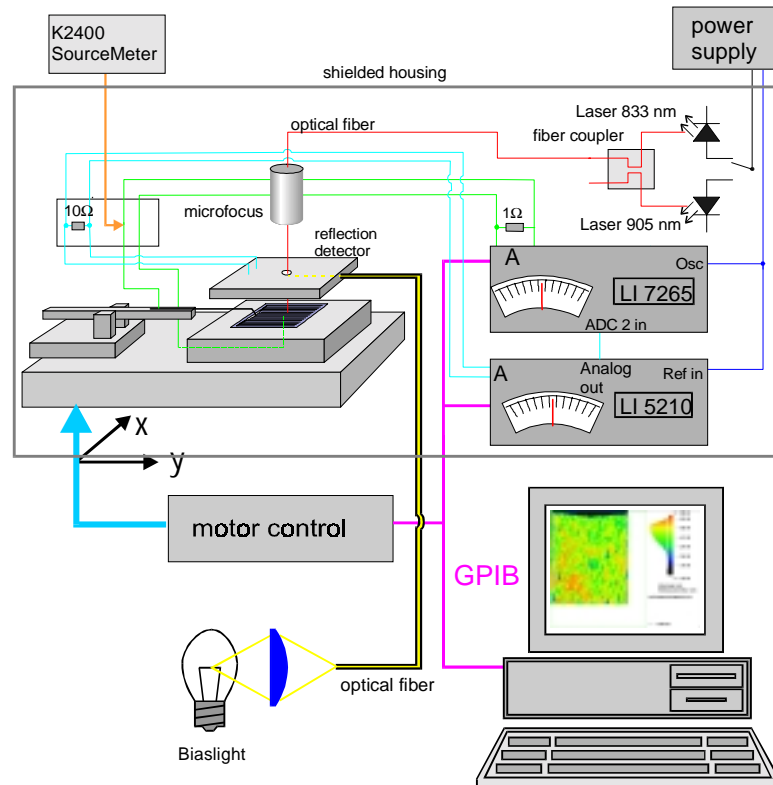


Fig. 40: Aufbau der LBIC Meßanlage. Die Zelle wird mittels xy-Tisch unter dem über eine Glasfaser eingekoppelten Laserstrahl verfahren. Über zwei Lock-In Verstärker wird der vom Laser erzeugte Kurzschlußstrom gemessen und im Rechner zu einem orts aufgelösten Bild verarbeitet (aus [108]).

Gleichzeitig wird orts aufgelöst auch die Reflexion der Zelle gemessen. Nach entsprechender Umrechnung (Gleichung 3-5) erhält man daraus die orts aufgelöste Quantenausbeute bei dieser Wellenlänge. Wird nicht nur bei einer, sondern bei mehreren (drei oder vier) Wellenlängen gemessen, läßt sich nach Gleichung 3-8 auch L_{eff} orts aufgelöst bestimmen [108, 109].

Ein lokal geringes LBIC-Signal kann mehrere Ursachen haben: So verhindern die Metallkontakte des Fingergrids den Eintritt des Laserlichts in die Zelle. Bei EWT-Zellen ist die Frontseite frei von Kontakten, jedoch trägt Licht, das in die Verbindungslöcher fällt auch nicht zur Stromgeneration bei; die Verbindungslöcher sind daher als Stromsenken sichtbar. An Korngrenzen von multikristallinem Silizium ist die Rekombination oft erhöht, das LBIC Signal folglich kleiner. Auch lokale Kurzschlüsse verringern den an den Kontakten gemessenen Strom (generierter Strom fließt innerhalb der Zelle ab und erreicht wegen Serienwiderständen nicht die externen Kontakte), wodurch LBIC Messungen eine – verglichen mit Thermographiemessungen – einfache Möglichkeit darstellen, Kurzschlüsse zu lokalisieren (vgl. Fig. 80).

3.4 Thermographie

Bei der Thermographie wird ausgenutzt, daß ohmsche Verluste und auch die Rekombination von Ladungsträgern zur Erwärmung des Wafers führen. Die dadurch verursachten Temperaturunterschiede sind allerdings sehr klein. Eine orts aufgelöste Messung wird zusätzlich durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Silizium erschwert.

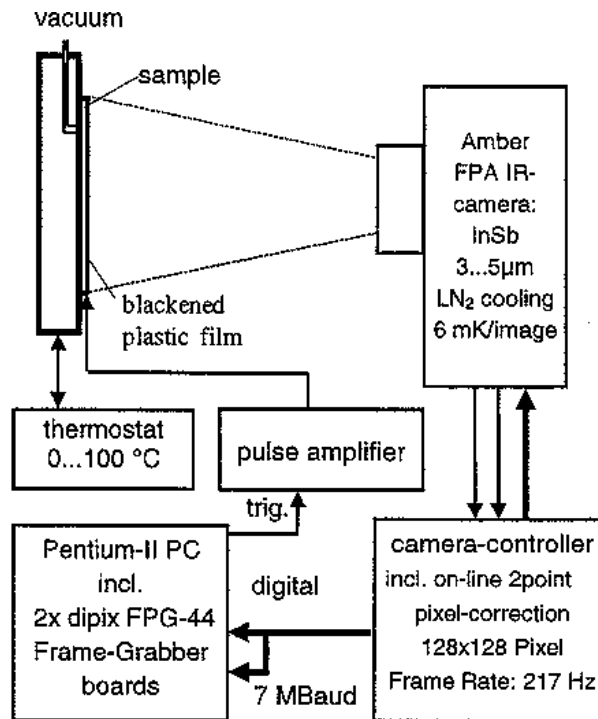


Fig. 41: Funktionsweise der dynamischen Lock-In Thermographie, die zur Shuntlokalisierung verwendet wurde (aus [110]). An die Solarzelle wird eine pulsierende Spannung angelegt, die Infrarotkamera nimmt die erhöhte Wärmestrahlung im Bereich des Kurzschlusses auf. Durch Lock-In Technik und Messungen über viele Zyklen kann die thermische Auflösung bis auf 10 μ K reduziert werden.

Um die thermische Auflösung zu verbessern, wird die an die Solarzelle angelegte Spannung pulsformig moduliert. Eine mit flüssigem Stickstoff gekühlte IR-Kamera nimmt ein 128 * 128 Punkte großes Bild im Wellenlängenbereich 3 - 5 μ m mit einer Temperaturauflösung von 6 mK auf. Die Temperaturmodulation wird im Lock-In Verfahren für jedes Pixel einzeln mittels Rechner ausgewertet, wobei nach 20 min Meßzeit ein Signal-Rausch-Verhältnis von 10 μ K erreicht wird. Die Wärmeausbreitung im Wafer kann wegen der Modulation der angelegten Spannung herausgerechnet werden, so daß auch die Ortsauflösung verbessert wird. Unter Verwendung eines entsprechenden Objektivs kann eine Ortsauflösung von 10 μ m erzielt werden [110-114]. Die in Kapitel 5.2.3 gezeigten Thermographiebilder wurden am Max-Planck-Institut (MPI) in Halle aufgenommen.

4. Kapitel - Prozeßevaluierung

In diesem Kapitel werden EWT-Solarzellen untersucht, die mit den in Kapitel 2 erläuterten Prozeßtechnologien hergestellt wurden. Die Verbindungslöcher werden dabei mittels Wafersäge oder Laser erzeugt. Für die pn-Bereichsdefinition durch lokales Entfernen des Rückseitenemitters wird die Wafersäge ebenfalls verwendet. Zusätzlich wird auch reaktives Plasmaätzen geprüft. In einer weiteren Untersuchung verhindert eine Diffusionsbarriere bereichsweise die Eindiffusion von Phosphor.

Anschließend werden verschiedene Gridgeometrien verglichen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf multikristallines Silizium wird im vorletzten Abschnitt geprüft. Zum Abschluß wird ein Prozeß vorgestellt, der den vorangegangenen Untersuchungen zufolge am besten für die industrielle Herstellung von EWT-Zellen geeignet ist.

4.1 Vergleich von Laser und Säge zur Locherstellung

Die beiden Varianten zur Herstellung der Löcher unterscheiden sich hauptsächlich auf der technologischen Seite. Der potentiell hohe Durchsatz der Sägetechnik speziell in Verbindung mit der gleichzeitigen Texturierung der Frontseite von multikristallinem Silizium erscheint zwar attraktiv, jedoch läßt sich die von Gräben überzogene Rückseite nicht zuverlässig mit einer diffusionsverhindernden Schicht überziehen (siehe Kapitel 2.2.1). Dadurch sind bei Zellen mit gesägten Löchern die möglichen Prozeßtechnologien zur pn-Bereichsdefinition (Diffusionsbarriere oder Emitterentfernen) schon auf Entfernen des Emitters mittels Plasmaätzen (wobei die Kontakte als Ätzbarriere verwendet werden) oder mittels Wafersäge festgelegt. Die Auswertung der Zellen ist dort aufgeführt (Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2.2).

Im Gegensatz zu den gesägten Zellen erlaubt die – bis auf die Löcher selber – ebene Oberfläche der gelaserten Wafer problemlose Maskierung der Oberfläche mittels Siliziumnitrid, Lack oder anderen siebgedruckten Schichten. Beim Druck der Kontakte werden die gelaserten Löcher teilweise mit Paste gefüllt, die Zellvorderseite bleibt jedoch frei von Paste (siehe Fig. 34).

Neue Entwicklungen in der Lasertechnik zu mehr Leistung und die Verwendung von piezogesteuerten Ablenkspiegeln zur Laserstrahlsteuerung (anstatt des massereichen xy-Tisches) werden in Zukunft sicher auch zur Erhöhung des Durchsatzes bei der Herstellung von EWT-Zellen beitragen. Wegen der höheren Stabilität, und wegen der nicht durch Sägeschnitte veränderten Oberfläche wurde in den meisten Untersuchungen ein Laser zur Erstellung der Verbindungslöcher verwendet. Die Vor- und Nachteile von Laser- und Sägetechnik sind in Tabelle 4-1 nochmals zusammengefaßt.

In der LBIC Aufnahme einer Zelle mit gesägten Verbindungslöchern (Fig. 42 rechts) ist zu erkennen, daß die Stromgeneration in den Basisbereichen durch die Gräben reduziert ist. In den Bereichen mit Rückseitenemitter ist die Stromgeneration in den Gräben dagegen erhöht, dort überwiegt der Vorteil der rückseitigen Einsammlung die verringerte Generation aufgrund der geringeren Waferdicke.

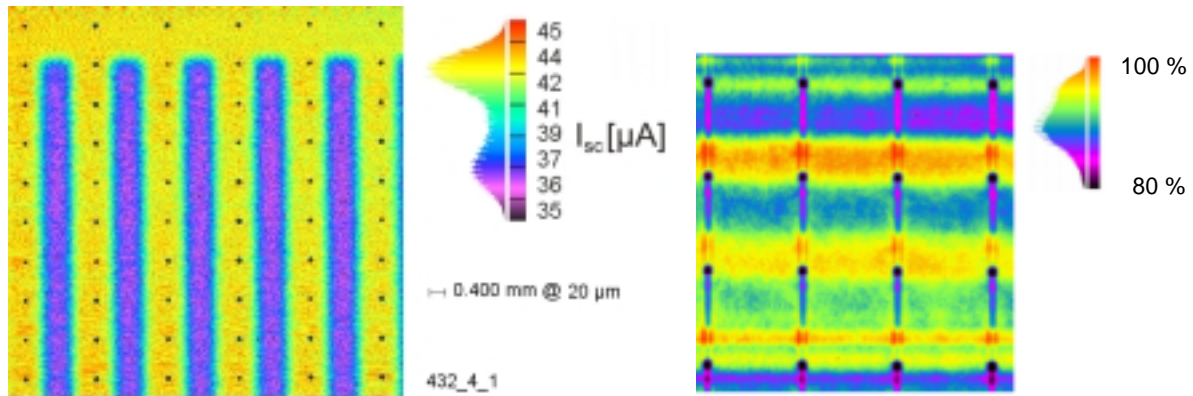


Fig. 42: Links LBIC Aufnahme einer Zelle mit gelaserten Verbindungslöchern unter Frontbeleuchtung. Die Verbindungslöcher sind deutlich zu erkennen. Die Trennung von p- und n-Bereich wurde mittels Diffusionsbarriere erzielt. - Rechts LBIC Aufnahme einer EWT-Zelle, bei der die Löcher durch Sägen erzielt wurden. Die vertikalen Schnitte liegen auf der Vorderseite. Im rechten Bild wurden die p- und n-Bereiche der Rückseite durch lokales Abfräsen des Emitters definiert (Beide Messungen mit $\lambda = 905$ nm).

Eine LBIC Aufnahme mit hoher Ortsauflösung ($1 \mu\text{m}$) am Rand eines Laserlochs zeigt zwar einen Abfall des Kurzschlußstromes vor Erreichen des Lochrandes. Korrigiert man die Messung jedoch um den Betrag des Meßlichtes, das wegen der Ausdehnung des Meßlaserpunktes in das Loch fällt, ergibt sich kein Abfall in Lochnähe (Fig. 43). Bedenken, daß in Lochnähe die Rekombination erhöht sei, bestätigten sich nicht. Ebenso wenig kann ein stromsteigernder Effekt [115] durch den vertikalen Emitter innerhalb der Löcher festgestellt werden.

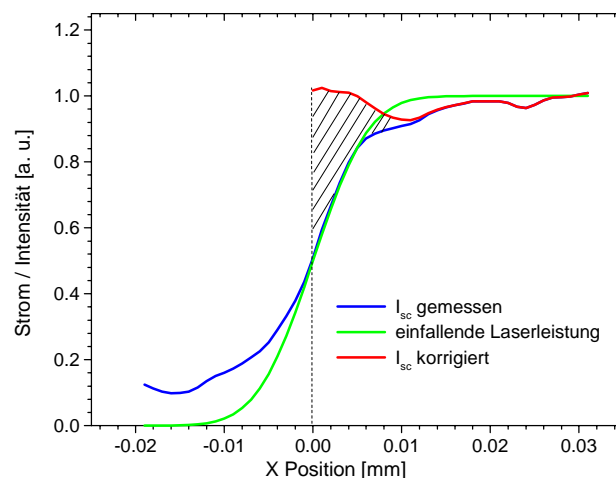


Fig. 43: Linienscan einer LBIC Messung am Rand eines Verbindungsloches. Die korrigierte Messung zeigt, daß die Rekombination innerhalb und am Rand der Verbindungslöcher nicht erhöht ist. Der Emitter in den Flanken des Loches erhöht die Einsammelwahrscheinlichkeit nicht oder zumindest nicht merklich ($\lambda = 905$ nm).

Diese Messungen stimmt auch mit einer Untersuchung des Fraunhofer ISE (Freiburg) an Hocheffizienz-Rückkontaktzellen überein: Bei einem Teil dieser Zellen wurde Front- und Rückseitenemitter durch Verbindungslöcher elektrisch verbunden. Bei einem Vergleich von Zellen mit und ohne Verbindungslöcher konnte keine Verringerung des Wirkungsgrades aufgrund der Verbindungslöchern festgestellt werden [116].

Tabelle 4-1: Vergleich Lochherstellung mittels Säge und Laser

Säge	Laser
+ hoher Durchsatz mit gleichzeitiger Oberflächen- texturierung bei Verwendung eines geeigneten Werkzeugs möglich	o Hoher Durchsatz noch nicht bewiesen
– Stabilität des Wafer verringert sich	+ Stabilität des Wafers bleibt unverändert
– senkrechte Flanken erschweren Maskierung	+ keine Beschränkung bei der Maskierung
– durch Kapillareffekte läuft Metallisierungspaste in Frontgräben	+ Verbindungslöcher werden zur Hälfte mit Paste gefüllt, auf die Vorderseite gelangt keine Paste
– Wafer muß gewendet werden	+ Alle Löcher werden von der Rückseite gebohrt
– Sägeschnitte beeinträchtigen Optik	+ Optik durch Löcher unbeeinträchtigt

4.2 Definition des p- und n-Bereichs der Zellrückseite

Nach dem Bohren der Verbindungslöcher ist die pn-Bereichsdefinition der wichtigste Prozeßschritt bei der Herstellung von EWT-Zellen. Im folgenden Abschnitt werden vier verschiedene Verfahren dazu vorgestellt, wobei die ersten beiden den Emitter nach der Diffusion lokal wieder entfernen und die anderen beiden eine Maskierschicht nutzen, um die Eindiffusion von Phosphor bereichsweise zu verhindern. Bei dieser Bereichsdefinition ist wichtig, daß dort, wo der pn-Übergang an die Oberfläche stößt, keine Rekombinations- oder Leckströme fließen (siehe auch Kapitel 5.1.3).

4.2.1 Mechanisches Emitterabfräsen

Die Prozeßsequenz für einen mechanisch lokal entfernten Emitter ist in Fig. 44 dargestellt. Nach dem Sägen der Verbindungslöcher und einem Ätzschritt erfolgte die Emitterdiffusion. Mit der Wafersäge wurde der Emitter anschließend in den Bereichen wieder entfernt (weggefräst), die für den Druck der Basiskontakte vorgesehen waren. Zum Justieren wurde die an der Wafersäge vorhandene Justieroptik genutzt. Anschließend wurden die Kontakte aufgedruckt und gefeuert. Die beim Fräsen entstehende Stufe führte zur Verdoppelung der Fingerbreite – für schmale Finger und geringe Fingerabstände ist der Prozeß daher ungeeignet (siehe auch Fig. 12). Der beste erzielte Wirkungsgrad (mit ARC) betrug 9,5 % (Tabelle 4-2). Die Leerlaufspannung wird durch J_{02} auf 544 mV begrenzt. Der hohe Wert von J_{02} ($6 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) ist auf die Schädigung der Oberfläche speziell im Bereich des pn-Übergangs (siehe Kapitel 5.1.3) beim Entfernen des Emitters zurückzuführen. J_{02} reduziert auch den FF , der zusätzlich aufgrund eines erhöhten Serienwiderstands verringert ist.

Tabelle 4-2: Beste EWT-Zelle mit mechanisch entferntem Emittter. Siliziumnitrid ARC, Zellgröße 25 cm², die Löcher wurden gesägt. Offene Klemmspannung und Füllfaktor sind aufgrund der Schädigung des pn-Übergangs auf der Rückseite gering - diese Schädigung zeigt sich im hohen Wert von J_{02} .

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{02} [A/cm ²]
lokales Emittter Abfräsen	61	31,9	544	9,5	$6 \cdot 10^{-7}$

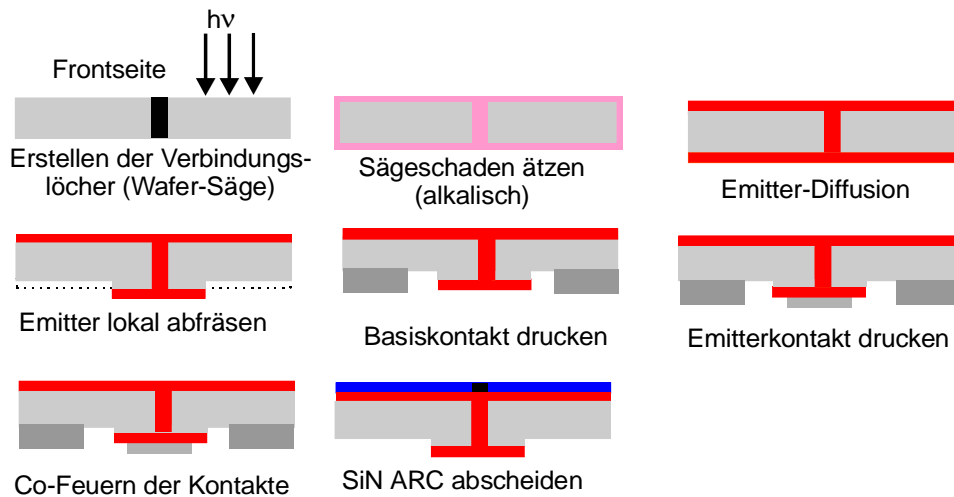


Fig. 44: EWT Prozeß, die Verbindungslöcher sind mittels überlappender Schnitte in Front- und Rückseite erzeugt, der ganzflächig eindiffundierte Emittter wurde an den späteren Basisbereichen mechanisch entfernt (ebenfalls mittels Wafersäge). Der Sägeschaden aufgrund des Emittterwegfrärens kann nicht entfernt werden ohne den übrigen Emittter zu zerstören.

4.2.2 Selbstjustierendes Plasmaätzen

4.2.2.1 Voruntersuchung zum Plasmaätzen an konventionellen Zellen

In einer Voruntersuchung an konventionell hergestellten Solarzellen wurde geprüft, ob sich der Emittter tatsächlich mittels Plasmaätzen entfernen läßt und welche Ätzdauer dafür nötig ist. Dazu wurden sägeschadengeätzte Wafer mit phosphorhaltiger Diffusionspaste bedruckt, getrocknet und gefeuert. Anschließend wurden alle Wafer übereinandergestapelt, mit einem Aluminiumblock beschwert und verschieden lange dem reaktiven Plasma ausgesetzt, um den parasitären pn-Übergang am Rand der Zellen zu trennen. (Gasfluß: CF₄ 20 cm³/min, O₂ 5 cm³/min, Mikrowellenleistung 280 W, Prozeßdruck 0,5 Torr). Das Phosphorglas der Diffusion wurde zusammen mit möglichen Rückständen vom Plasmaätzen in 5 % HF entfernt. Der Emitterschichtwiderstand betrug 40 Ω/sqr. Abschließend wurden die Kontakte gedruckt, getrocknet und gefeuert (zuerst Emittter mit Ag-Paste, dann Basis mit Al-Paste).

In Fig. 45 sind die Shuntwerte in Abhängigkeit der Ätzdauer aufgetragen. Die hohen Shuntwerte ($> 1000 \Omega\text{cm}^2$) lassen darauf schließen, daß 6 min Ätzdauer ausreichend sind, um den parasitären pn-Übergang am Zellrand zu entfernen. Die beste Zelle erreichte einen Wirkungsgrad von 10,4 % (ohne ARC) und eine Leerlaufspannung von 600 mV.

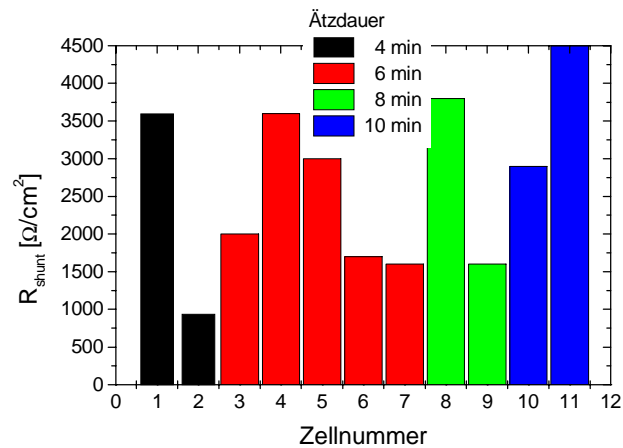


Fig. 45: Shuntwiderstand und Ätzdauer beim Kantenätzen. 4 - 6 min Ätzdauer sind offenbar ausreichend, um den parasitären pn-Übergang zu trennen und Shuntwiderstände $> 1000 \Omega\text{cm}^2$ zu erhalten.

4.2.2.2 Plasmaätzen bei EWT-Zellen

Das Ergebnis der erfolgreichen Voruntersuchung zum Emittentfernen an konventionellen Zellen wurde im folgenden Prozeß auf EWT-Zellen übertragen (Fig. 46). Die Verbindungslöcher wurden mechanisch mit der Wafersäge erzeugt. Nach der Emittendiffusion (POCl_3 -Gasphasendiffusion) und nach Ätzen des Phosphorglases wurden die Kontakte auf die Rückseite gedruckt und gefeuert (Fingerabstand 4,5 mm). Der Aluminiumanteil in der Metallisierungspaste, die für die Basiskontakte verwendet wurde, überkompensiert dabei den Emitter und ermöglicht den Kontakt zur Basis. Anschließend wurde der Emitter zwischen den Basis- und Emitterkontakten mittels Plasmaätzen entfernt, wobei die Kontakte als Ätzbarriere dienten.

J_{02} war mit $4 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ so groß, daß sich deutliche Einbußen im FF (63 %) und in V_{oc} (551 mV) ergaben (Tabelle 4-3). Längeres Ätzen erhöhte nicht den Shuntwiderstand, führte jedoch zu weiterer Verringerung von V_{oc} (um 19 mV). Durch Absägen des parasitären pn-Übergangs am Rand konnte der Shuntwiderstand bei einem Teil der prozessierten Zellen erhöht werden (von 55 auf $230 \Omega\text{cm}^2$). Dies deutet auf ungenügende Entfernung des Emitters hin, die sich jedoch auch durch längeres Ätzen nicht verbessern ließ.

Nach Abscheiden einer Antireflexschicht konnte mit diesem simplen Prozeß immerhin ein Wirkungsgrad von über 11 % bei $V_{oc} = 552 \text{ mV}$ erzielt werden.

Beim selbstjustierten Plasmaätzen wurde eine Verfärbung der silberenthaltenden Kontakte festgestellt, die auf Bildung von AgF zurückzuführen sein könnte. Dadurch könnte die Langzeitstabilität der Kontakte beeinträchtigt sein. Die offene Klemmspannung und der Füllfaktor sind durch den Plasmaschaden begrenzt (Kapitel 5.1.3). Das Verfahren ist alleine deshalb attraktiv, weil ein Justierschritt eingespart wird, indem die Kontakte als Ätzbarriere verwendet werden. Diese Vereinfachung des Prozesses muß jedoch in Verbindung mit der Wirkungsgradbeschränkung bewertet werden.

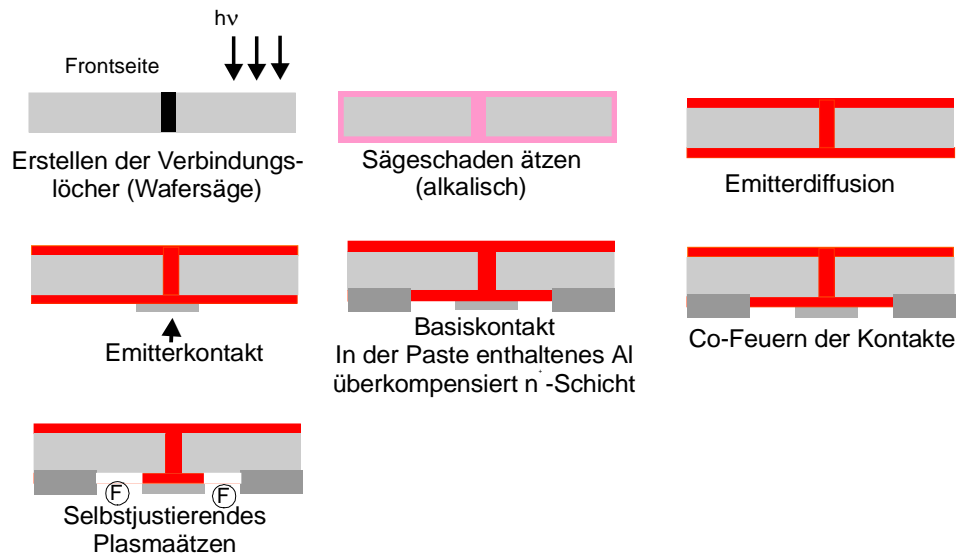


Fig. 46: Einfachster Prozeß zur Herstellung von EWT-Zellen: die Trennung von p^- - und n^+ -Bereich erfolgt durch (selbstjustierendes) Plasmaätzen, das den Emitter zwischen den Kontakten entfernt. Die siebgedruckten Kontakte dienen dabei als Ätzbarriere. Die Verbindungslöcher wurden gesägt.

Tabelle 4-3: EWT-Zelle im Vergleich mit einer konventionellen Referenzzelle. Der Emitter zwischen Emitter- und Basiskontakten der EWT-Zelle wurde mittels reaktivem Plasma entfernt. Offene Klemmspannung und Füllfaktor sind durch den Plasmaschaden verringert. Beide Zellen 25 cm^2 Zellfläche und ohne ARC.

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{02} [A/cm ²]
selbstjustierendes Plasmaätzen	63,4	24,3	551	8,5	$4 \cdot 10^{-7}$
Konventionelle Zelle	75,6	21,4	592	9,6	$3 \cdot 10^{-8}$

4.2.3 Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid

Im Gegensatz zu den beiden vorigen Methoden bietet die Verwendung einer Diffusionsbarriere ein höheres Wirkungsgradpotential, da durch eine Diffusionsbarriere die Schädigung der Zelloberfläche im Bereich des pn -Übergangs vermieden wird. Eine geeignete Barrierenschicht könnte sogar eine passivierende Wirkung – d. h. geringere Rekombination als bei unbeschichteter Siliziumoberfläche – erzielen (vgl. Kapitel 5.4.5).

Siliziumnitrid kann nur ganzflächig abgeschieden werden und muß daher in zusätzlichen Prozeßschritten maskiert und teilweise wieder entfernt werden (Prozeßsequenz siehe Fig. 47). Das lokale Entfernen des Siliziumnitrid erfolgte im Plasmaätzter, die übrige Oberfläche wurde dabei durch einen siebgedruckten organischen Schutzlack vor dem reaktiven Plasma geschützt.

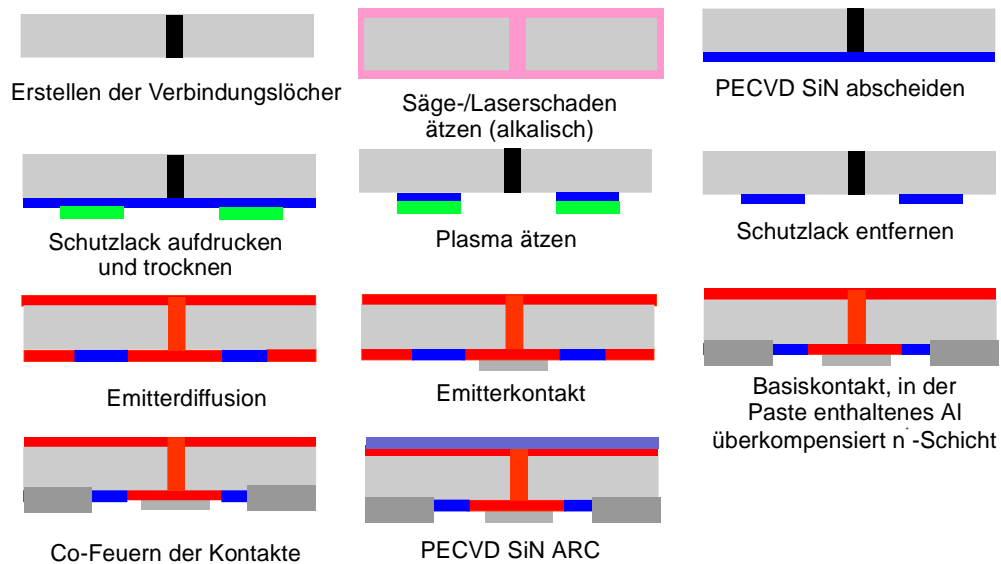


Fig. 47: Prozeßsequenz mit Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere (Verbindungslöcher gelasert). Die Bereichsdefinition erfolgt durch Aufdrucken eines organischen Lacks, der die SiN-Schicht lokal vor dem reaktiven Plasma schützt.

Unmittelbar nach dem Feuern erreichte die beste Zelle einen Wirkungsgrad von 9,7 % und eine Leerlaufspannung von 582 mV, also deutlich mehr als bei den vorigen Prozessen. Durch Abscheiden einer ARC-Schicht konnte der Wirkungsgrad auf 13,6 % gesteigert werden, wobei sich V_{oc} auf 592 mV erhöhte.

Tabelle 4-4: EWT-Zellen ohne und mit ARC, die pn-Bereichsdefinition erfolgte mittels PECVD Siliziumnitrid .

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{02} [A/cm ²]
SiN als Diffusionsbarriere, ohne ARC	67,6	24,5	582	9,7	$1,2 \cdot 10^{-7}$
SiN als Diffusionsbarriere, mit ARC	69,6	33,2	592	13,6	$1,2 \cdot 10^{-7}$

In einem weiteren Prozeß wurde die ARC vor dem Drucken und Feuern der Kontakte in der Absicht abgeschieden, durch eine Volumenpassivierung mittels Wasserstoff beim Feuern (siehe Kapitel 4.6.2) die Leerlaufspannung noch weiter zu erhöhen [87]. Während dem Feuern der Kontakte löste sich die ARC jedoch teilweise ab (sog. Blistering, Fig. 48). Möglicherweise ist dies auf Rückstände zurückzuführen, die sich beim Plasmaätzen auf der ungeschützten Frontseite ablagern. Je nach Beeinträchtigung der ARC wurden mit diesem Prozeß Wirkungsgrade bis 10,7 % und $V_{oc} = 598$ mV erreicht (Zellfläche 25 cm²).

Im nächsten Schritt wird Siliziumnitrid schon vor dem Plasmaätzen abgeschieden und die Frontseite vor dem Plasma geschützt.



Fig. 48: Fotos dreier Zellen, die vor dem Feuern der Kontakte mit einer Siliziumnitrid ARC beschichtet wurden, die sich während dem Feuern teilweise ablöst (sog. Blistering). Mögliche Ursache sind Rückstände, die sich während dem Plasmaätzen der Rückseite auf der Frontseite ablagern und die zum Abplatzen des SiN bei hohen Temperaturen führen.

Nachdem mit der Diffusionsbarriere eine geeignete Methode für die pn-Bereichsdefinition gefunden war, wurde die Zellfläche von 25 cm^2 auf 100 cm^2 erhöht. In Verbindung mit einem Zwei-Stufen-Emitter (vgl. Kapitel 2.6.4) und alkalischer Frontseitentextur wurde ein Wirkungsgrad von 16,1 % bei einer offenen Klemmspannung von 599 mV erzielt (Tabelle 4-5). Eine konventionelle (ebenfalls alkalisch texturierte) Zelle aus dem gleichen Material erreichte dagegen nur 15,1 %. Damit war ein geeigneter Herstellungsprozeß für EWT-Zellen gefunden, der zwar viele Prozeßschritte enthielt, der aber auf Photolithographie zur pn-Bereichsdefinition verzichten konnte.

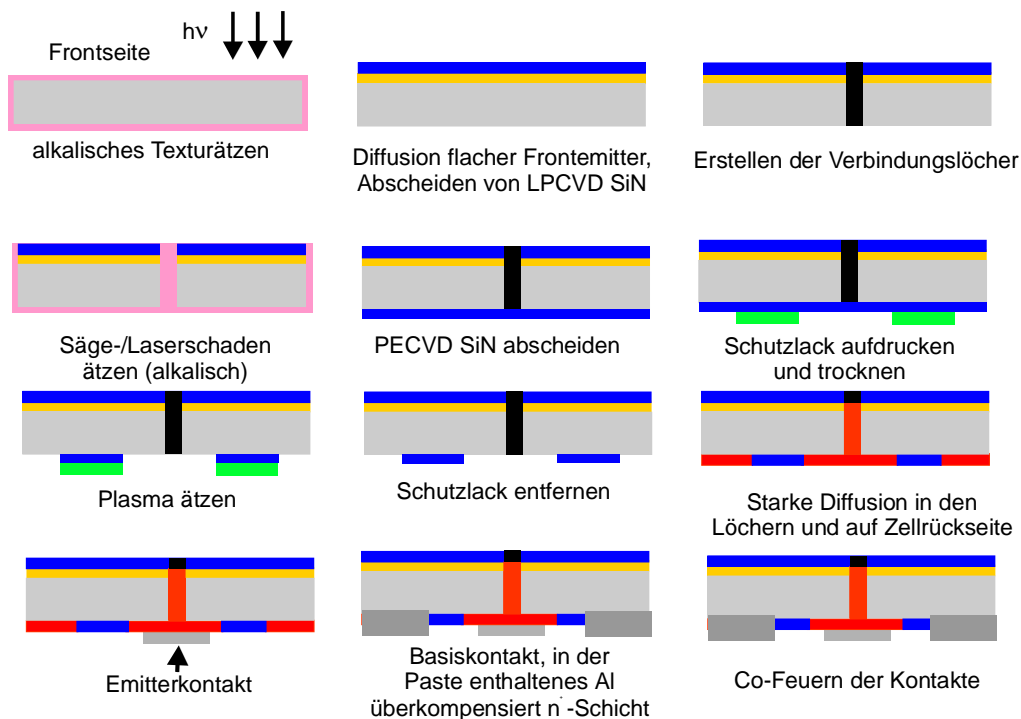


Fig. 49: EWT-Zellen Prozeß mit Zwei-Stufen-Emitter und Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere zur Definition der pn-Bereiche auf der Rückseite. Da Siliziumnitrid nur ganzflächig abgeschieden werden kann, muß die SiN-Schicht im Plasmaätmater teilweise wieder entfernt werden, wobei die p-Bereiche durch einen siebgedruckten organischen Lack vor dem Plasma geschützt werden. Der Schutzlack wird vor der Diffusion wieder entfernt.

Tabelle 4-5: EWT-Zelle mit einer Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid zur Definition von rückseitigen p- und n-Bereichen und mit Zwei-Stufen-Emitter. Die Vorderseite beider Zellen ist alkalisch texturiert. Im Vergleich zur konventionellen Zelle ist der Kurzschlußstrom der EWT-Zelle 20 % höher, während die offene Klemmspannung knapp 4 % geringer ist (beide Zellen Zellfläche 100 cm²).

	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]	η [%]	J_{02} [A/cm ²]	R_{serie} [Ω cm ²]
EWT, select. Em., Front alk. text, SiN als Barriere	37,8	599	72	16,1	$5 \cdot 10^{-8}$	1,3
Konventionelle Zelle, alk. text. Frontseite	31,7	621	77	15,1	$3 \cdot 10^{-8}$	0,6

4.2.4 Siebgedruckte Diffusionsbarriere

Im Gegensatz zu der Diffusionsbarriere aus Siliziumnitrid kann die in Kapitel 2.3.2.2 vorgestellte siebdruckbare Barriere in einem einzigen Prozeßschritt aufgedruckt und gefeuert werden (Prozeßsequenz siehe Fig. 68). Die Definition des pn-Bereiches mittels siebdruckbarer Barrierenpaste ist daher – bis auf den erforderlichen Justierschritt – in der Einfachheit der Prozeßführung durchaus mit selbstjustierendem Plasmaätzen vergleichbar.

Bezüglich der erreichbaren offenen Klemmspannung und des Shuntwiderstandes ist die siebdruckbare Barriere der Verwendung von Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere gleichwertig, wenn nicht sogar überlegen. Wie beim vorigen Prozeß mit Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere und Zwei-Stufen-Emitter wurde $V_{oc} = 600$ mV und $J_{sc} = 37,9$ mA/cm² erreicht. Der geringere Füllfaktor (70 % statt 72 %) ist unabhängig von der Art der Diffusionsbarriere auf einen höheren Serienwiderstand (1,4 Ω cm² statt 1,3 Ω cm²) zurückzuführen, der wiederum einem höheren Frontemitterschichtwiderstand zuzuschreiben ist (vgl. Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6).

Wegen der geringeren Zahl notwendiger Prozeßschritte ist die siebgedruckte Barriere zuverlässiger, die Wirkungsgrade sind sehr gut reproduzierbar und unterliegen nur geringen Schwankungen. Als Maß für die Qualität der Barriere kann der erreichte Shuntwiderstand von bis zu 1800 Ω cm² auf einer 100 cm² Zelle angesehen werden.

Tabelle 4-6: EWT-Zelle mit gedruckter Diffusionsbarriere zur Definition von rückseitigen p- und n-Bereichen. Zelle mit Zwei-Stufen-Emitter und alkalisch texturierter Vorderseite. Der geringfügig kleinere Wirkungsgrad verglichen mit der Zelle in Tabelle 4-5 (Siliziumnitrid als Diffusionsbarriere) ist auf einen etwas höheren Serienwiderstand zurückzuführen. Der Wirkungsgrad der Zelle wurde vom JRC, Ispra, bestätigt (siehe Anhang).

Zelle	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{02} [10^{-8} A cm ²]	R_{serie} [Ω cm ²]
EWT-Zelle, siebgedruckte Paste als Diffusionsbarriere	69,6	37,9	600	15,8	3,7	1,4

4.2.5 Zusammenfassung zur pn-Bereichsdefinition

Wegen der Schädigung der rückseitigen Oberfläche und dem dadurch erhöhten Rekombinationsstrom J_{02} ($> 4 \cdot 10^{-7}$ A/cm²) sind EWT-Solarzellen, bei denen der Emitter nach der Diffusion bereichsweise wieder entfernt wurde, in der erreichbaren offenen Klemmspannung deutlich limitiert (siehe auch Kapitel 5.1.3). Statt $V_{oc} > 580$ mV wie bei Zellen mit Diffusionsbarriere wurde nur $V_{oc} = 552$ mV erreicht.

Wurde hingegen die Diffusion lokal mittels Diffusionsbarriere verhindert, wurde ein J_{02} zwischen $5 \cdot 10^{-8}$ A/cm² und $8 \cdot 10^{-8}$ A/cm² bestimmt. Der Herstellungsaufwand von EWT-Zellen unter Verwendung einer siebgedruckten Diffusionsbarriere unterscheidet sich vom einfachsten untersuchten Prozeß (selbstjustiertes Plasmaätzen) nur durch den zusätzlichen Justierschritt beim Druck der Diffusionsbarriere. Um einen Überblick über die Methoden zu gewinnen, die zur Definition von rückseitigem p- und n-Bereich verwendet werden können, sind in Tabelle 4-7 die Vor- und Nachteile nochmals zusammengefaßt. Abschließend läßt sich feststellen, daß die siebgedruckte Diffusionsbarriere bei der Definition des rückseitigen pn-Bereiches mit Abstand am Besten abschneidet, wenn Herstellungsaufwand und Wirkungsgradpotential als Kriterium gelten.

Tabelle 4-7: Vergleich der möglichen Methoden zur Definition des rückseitigen p- und n⁺-Bereichs

Methode		Vorteile	Nachteile
Emitter entfernen	Säge	nur ein Prozeßschritt	Sägeschaden kann nicht entfernt werden, hohes J_{02}
	Laser	nur ein Prozeßschritt, Schaden geringer als beim Sägen, trockener Prozeß	Laserschaden kann nicht entfernt werden, hohes J_{02}
	naßchemisch	schädigungsfrei	Maske nötig, daher mehrere Prozeßschritte. Maskierungswirkung innerhalb der Löcher unzuverlässig
	Trockenätzen	Kontakte können als Ätzbarriere verwendet werden, ein Justierschritt entfällt	Plasmaschaden, hohes J_{02}
Diffusionsbarriere	Siliziumnitrid	schädigungsfrei, zuverlässig, sichere Diffusion innerhalb der Verbindungslöcher	mehrere Prozeßschritte, da Maskierung von SiN-Schicht nötig
	Siebgedruckte Barrierenpaste	schädigungsfrei, sichere Diffusion innerhalb der Verbindungslöcher, nur ein Prozeßschritt (Drucken und Feuern), kostengünstig	zusätzlicher Justierschritt

4.3 Emitterdiffusion

Durch die Emitterdiffusion erhält der Wafer den nötigen pn-Übergang, an dem die Ladungsträgertrennung stattfindet. Zwei Diffusionsverfahren wurden auf ihre Eignung für die EWT-Zellenherstellung geprüft, und zwar POCl_3 Gasphasendiffusion und die Diffusion mittels einer siebgedruckten Phosphorpaste. Da die Phosphorpaste nur einseitig aufgedruckt werden kann, lag es nahe, unterschiedliche Diffusionstemperaturen für Vorder- und Rückseite des Wafers zu verwenden, um einen Zwei-Stufen-Emitter zu erhalten (hohe Phosphorkonzentration auf der Rückseite, niedrige P-Konzentration auf der Vorderseite, vgl. Kapitel 2.6.4). Höhere Wirkungsgrade wurden jedoch mit POCl_3 -diffundierten EWT-Zellen erzielt, durch Verwendung eines Zwei-Stufen-Emitters konnten diese sogar noch gesteigert werden.

4.3.1 Diffusion mittels Siebdruck P-Paste

Auf Grundlage von Voruntersuchungen zum Schichtwiderstand wurden Wafer mit lasergebohrten Verbindungslöchern lokal mit Siliziumnitrid beschichtet (Kapitel 4.2.3) beschrieben, anschließend mit Phosphorpaste bedruckt und im Gürtelofen diffundiert. Für jeden Finger wurden drei Lochreihen gelasert, damit der Serienwiderstandsbeitrag des Frontemitters bei einem Fingerabstand von 4,5 mm nicht zu groß würde. Zuerst wurde die Rückseite mit P-Paste bedruckt und diffundiert, anschließend die Vorderseite. Der Schichtwiderstand betrug nach der zweiten Diffusion $80 \Omega/\text{sqr}$ auf der Frontseite und $22 \Omega/\text{sqr}$ auf der Rückseite. Da die Basisbereiche vollständig mit Siliziumnitrid (80 nm dick) bedeckt waren, wurden die Basiskontakte zuerst aufgedruckt (Paste B Al) und bei 900°C gefeuert. Es folgte der Druck der Emitterkontakte (Ag Paste) und ein zweiter Durchlauf des Feuerofens bei 800°C . Unter einem optischen Mikroskop wurde kontrolliert, wie gut sich die P-Paste in die Verbindungslöcher drücken läßt; das Ergebnis war zufriedenstellend, jedoch deuten sowohl die niedrigen Shuntwerte ($< 250 \Omega\text{cm}^2$) als auch der höhere Serienwiderstand ($3,2 \Omega\text{cm}^2$) auf unvollständig diffundierte Lochinnenbereiche hin. In Tabelle 4-8 sind die Ergebnisse der IV-Messung (ohne ARC) aufgeführt. Der Kurzschlußstrom ($26 \text{ mA}/\text{cm}^2$) ist etwas höher als bei der POCl_3 -diffundierten Vergleichszelle, was jedoch auf Rückstände von der P-Diffusion, die gewissermaßen als ARC wirken, zurückzuführen sein dürfte. Die Leerlaufspannung (573 mV) ist nur unbedeutend niedriger als die der Vergleichszelle. Der Füllfaktor wird sowohl vom Serienwiderstand ($3,2 \Omega\text{cm}^2$), als auch vom Shuntwiderstand ($250 \Omega\text{cm}^2$) merklich reduziert ($FF < 60 \%$).

4.3.2 Gasphasendiffusion

Der Prozeß wurde daher mit kleinen Abwandlungen wiederholt. Die Diffusion erfolgte diesmal nicht mittels P-Paste, sondern im POCl_3 -Diffusionsofen (ohne Zwei-Stufen-Emitter). Der Schichtwiderstand nach der Diffusion wurde homogen zu $30 - 33 \Omega/\text{sqr}$ bestimmt. Bei den EWT-Zellen aus diesem Prozeß wurden Shuntwiderstände über $1000 \Omega\text{cm}^2$ gemessen, woraus geschlossen werden kann, daß bei POCl_3 -Gasphasendiffusion auch das Innere der Verbindungslöcher zuverlässig mit Emitter bedeckt wird. Dieser Schluß wird auch durch den kleineren Serienwiderstand bestätigt. Damit ist eindeutig die POCl_3 -Diffusion für EWT-Zellen geeigneter.

Tabelle 4-8: Vergleich der Diffusion mittels siebgedruckter P-Paste und mittels POCl_3 . Die POCl_3 -Diffusion führt offenbar zu einer zuverlässigeren Phosphorschicht innerhalb der Verbindungslöcher wie sich an R_{serie} und R_{shunt} zeigt.

Zelle	FF [%]	J_{sc} [mA cm ⁻²]	V_{oc} [mV]	η [%]	R_{serie} [Ωcm^2]	R_{shunt} [Ωcm^2]
EWT, P-Paste	59,7	26,1	573	8,9	3,2	250
EWT, POCl_3	66,7	24,5	584	9,5	2,2	1100

4.3.3 Zwei-Stufen-Emitter

Für die Herstellung von EWT-Zellen mit Zwei-Stufen-Emitter (selektiver Emitter) wurden von BP Solar (Madrid) vorprozessierte Wafer (alkalische Textur, hochohmiger Frontemitter, LPCVD Siliziumnitrid auf der Frontseite) verwendet. In diese Wafer wurden die Verbindungslöcher gelasert und der Laserschaden im alkalischen Ätzbad entfernt. Abscheiden von Siliziumnitrid (Diffusionsbarriere) auf der Rückseite und Druck der Ätzbarriere folgte. Nach Entfernen des Siliziumnitrid (Plasmaäztzer) an den späteren Emitterbereichen (und direkt unter dem Basiskontakt) folgte eine zweite starke Diffusion innerhalb der Löcher und auf der Zellrückseite. Abschließend wurden Basis und Emitterkontaktgrid gedruckt und gefeuert. Der Schichtwiderstand des Frontemitters betrug nach der zweiten Diffusion 80 - 100 Ω/sqr . (Der Frontemitterschichtwiderstand ändert sich aufgrund der hohen Temperatur, der die Wafer bei der zweiten Diffusion ausgesetzt sind). Auf der Rückseite wurden 7 - 10 Ω/sqr gemessen.

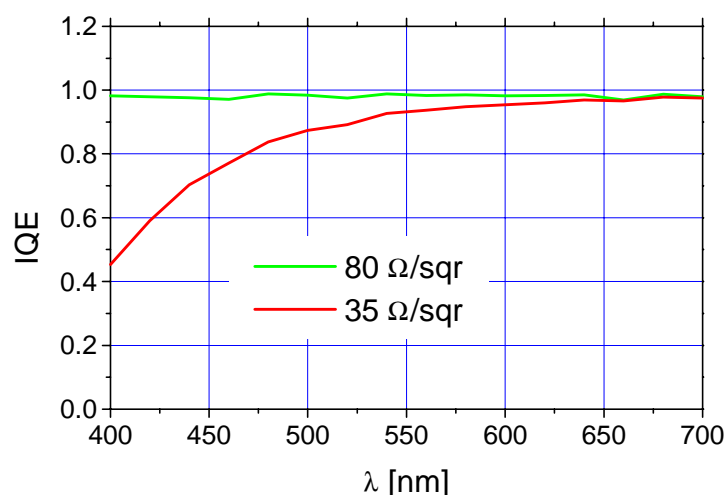


Fig. 50: IQE von Zellen mit unterschiedlichem Frontemitter. Im kurzwelligen Teil des Spektralbereiches beträgt die Eindringtiefe α^{-1} nur wenige Mikrometer, die IQE hängt daher hauptsächlich vom Emitter und der Oberflächenpassivierung ab (beide Zellen alkalisch texturiert mit ARC).

Aufgrund der alkalischen Texturierung und des hochwertigen Frontemitters konnte ein hoher Kurzschlußstrom von 37,8 mA/cm² (statt 36,2 mA/cm² bei homogenem Emitter) erreicht werden. Vergleicht man die EQE zweier Zellen mit und ohne selektiven Emitter zwischen

350 nm und 700 nm, so erwartet man nach Gleichung 3-6 eine um $1,6 \text{ mA/cm}^2$ höhere Kurzschlußstromdichte der Zelle mit dem $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Emitter (Fig. 50). Um diesen Betrag unterscheiden sich auch die Kurzschlußstromdichten der beiden Zellen in der IV-Messung (vgl. Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Vergleich von homogenem und selektivem Emitter bei EWT-Zellen. Durch den hochwertigen Frontemitter kann der Kurzschlußstrom gesteigert werden, während der Serienwiderstand durch den stark dotierten Emitter in den Verbindungslöchern reduziert wird.

	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	FF [%]	η [%]	R_{serie} [Ωcm^2]
Homogener Emitter, 35 Ω/sqr	36,2	594	64	13,8	2,0
Selektiver Emitter, 80 Ω/sqr und 7 Ω/sqr	37,8	599	72	16,1	1,3

Wird der Frontemitterschichtwiderstand sehr groß gewählt, erhöht sich der Serienwiderstandsbeitrag des Frontemitters. Die Computersimulation zeigt, daß bei etwa $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ ein Optimum erreicht wird (Fig. 90). Der Serienwiderstandsbeitrag innerhalb der Löcher verringert sich von $170 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $35 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ wenn der Emitterschichtwiderstand in den Löchern von $35 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ auf $7 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ reduziert wird (Gleichung 5-4). Diese Verringerung wird jedoch durch den Beitrag des Frontemitterschichtwiderstandes aufgehoben, der von $400 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei $35 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ auf $800 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ ansteigt (Gleichung 5-1). Aus der Rechnung ergibt sich folglich eine Nettoerhöhung von $300 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ für R_{serie} bei Verwendung des selektiven Emitters, die jedoch durch die gemessenen Werte nicht bestätigt wird. Möglicherweise ist die Phosphorkonzentration innerhalb der Löcher geringer, als auf den übrigen Waferflächen, so daß der Serienwiderstandsbeitrag der Löcher bei Zellen mit $35 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Emitter größer als angenommen ist.

4.4 Finger- und Lochabstände

Nachdem durch Vergleich verschiedener Verfahren in den vorangegangenen Teilkapiteln ein Prozeß gefunden wurde, der sich für die Herstellung von EWT-Zellen eignet, soll in diesem Abschnitt der Einfluß der Gridgeometrie und der Metallisierungspasten untersucht werden. Vier verschiedene Fingerabstände (1,3 - 4,5 mm) wurden experimentell untersucht, wobei ein Optimum bei einem Fingerabstand von etwa 2 mm gefunden wurde.

Elektronen, die im Frontemitter über dem Basisbusbar generiert werden, müssen einen besonders weiten Weg D zum nächsten Verbindungsloch zurücklegen (Fig. 51). Das Gleiche gilt auch für Löcher, die über dem Emitterbusbar generiert werden. Die Simulation des Füllfaktors im Bereich der Busbars abhängig vom Emitterschichtwiderstand zeigt, wie sehr der Füllfaktor in den Busbarbereichen mit steigendem Frontemitterschichtwiderstand sinkt (Fig. 56 und Fig. 57). Die Busbars sollten folglich möglichst schmal angelegt sein – aufgelötete Kupferstreifen müssen dann ihre elektrische Leitfähigkeit erhöhen.

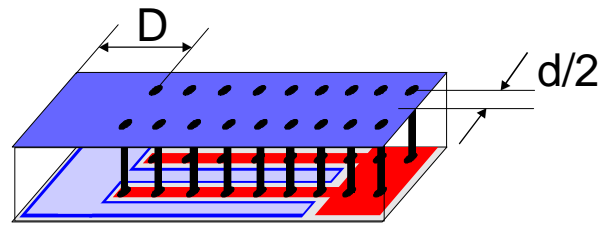


Fig. 51: Ausschnitt einer EWT-Zelle (Dicke W), der dazu dient, den Beitrag der Busbars zum Serienwiderstand zu erläutern. Ein Elektron, das am linken Zellrand generiert wird, muß den Weg $D+W$ zurücklegen, bis es den Emitterkontakt (rot) erreicht. Im Bereich der Finger beträgt dieser Wert nur $d/2+W$.

4.4.1 Gridgeometrie

Um die Serienwiderstandsverluste zu minimieren, wurden verschiedene Gridgeometrien untersucht. Die drei Griddesigns in Fig. 52 unterscheiden sich nur in den Fingerabständen (1,3 mm - 4,5 mm). In Fig. 53 sind zwei Griddesigns mit kürzeren Fingern gezeigt, wobei sich das rechte wesentlich von den vorherigen unterscheidet. Der Basisbereich wird dort nicht von der Diffusionsbarriere bedeckt, der Kontakt mit der Basis wird durch Überkompensieren des Emitters hergestellt. Die elektrische Trennung zwischen Basis- und Emitterbereich erfolgt nur durch einen schmalen, durch die Diffusionsbarriere geschützten Streifen. Diese „offene“ Variante bietet den Vorteil, daß beide Kontakte bei gleicher Temperatur und deshalb auch in einem einzigen Prozeßschritt gefeuert werden können (Co-Feuern). Außerdem wurden bei Zellen mit einer solchen offenen Maskierung (Siliziumnitrid) signifikant niedrigere Serienwiderstände gemessen als bei geschlossener Barriere, die den gesamten Basisbereich bedeckt (Tabelle 4-10).

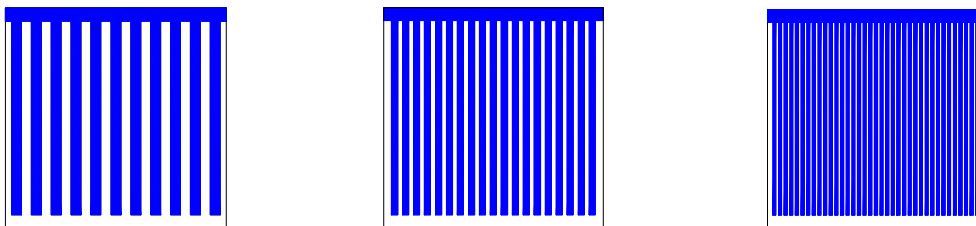


Fig. 52: Drei verschiedene Gridgeometrien des Siebes, mit dem der organische Schutzlack aufgedruckt wird. In den weißen Bereichen wird das Siliziumnitrid im Plasmaätzter entfernt und anschließend Phosphor eindiffundiert. Fingerabstand 4,5 mm (links), 2,5 mm (Mitte) und 1,3 mm (rechts). Basis- und Emitterbereiche sind etwa gleich groß.

Eine passivierende Wirkung der geschlossenen Barriere verglichen mit der offenen konnte nicht festgestellt werden: V_{oc} und J_{sc} unterschieden sich nicht, ebensowenig lassen sich in J_{01} und J_{02} signifikante Unterschiede ausmachen (Tabelle 4-10). Offen ausgeführte Barrieren führten zu den besten Wirkungsgraden (16,1%).

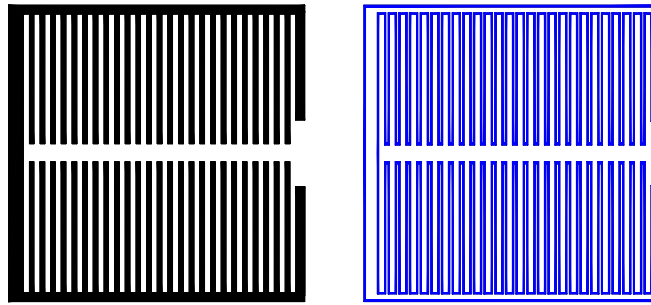


Fig. 53: Layout zweier Siebe für die Diffusionsbarriere. In den blauen bzw schwarzen Bereichen wird die Eindiffusion von Phosphor durch die Maskierschicht verhindert. Rechts ein „offenes“ Layout, bei dem die Eindiffusion von Phosphor nur in einem schmalen Bereich zwischen Basis- und Emitterbereich verhindert wird. Der Emitter im Basisbereich wird durch das in der Basismetallisierungspaste enthaltene Al überkompensiert. Im linken Bild die „geschlossene“ Version, bei der der gesamte Basisbereich von der Maskierschicht bedeckt wird. Fingerabstand 1,8 mm. Der breite Basisbusbar am Rand dieser Geometrie führte zu erhöhtem Serienwiderstand.

Tabelle 4-10: Vergleich der beiden Diffusionsbarrieren aus Fig. 53. Ist der ganze Basisbereich mit Siliziumnitrid bedeckt, ist der Serienwiderstand größer (trotz höherer Temperatur beim Feuern des Basiskontakts) als bei der offenen Barriere, die nur einen schmalen Streifen zwischen Emitter- und Basiskontakt bedeckt. Eine passivierende Wirkung der geschlossenen Barriere ist nicht festzustellen. Offene Klemmenspannung und die Dunkelströme sind bei beiden Zellen etwa gleich groß.

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{01} [10 ⁻¹² A cm ⁻²]	J_{02} [A cm ⁻²]	R_{serie} [Ω cm ²]
geschlossene Barriere	63,7	23,8	569	8,6	2,6	1,4*10 ⁻⁷	3,1
offene Barriere	65,3	24,2	567	9,0	2,8	1,8*10 ⁻⁷	2,3

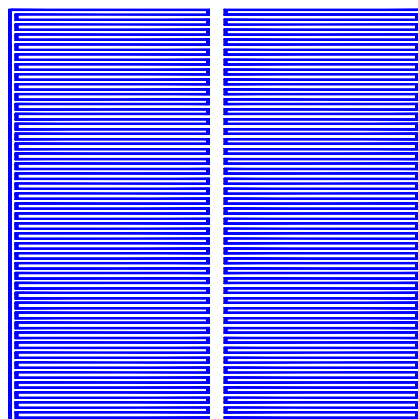


Fig. 54: Layout des Siebes, das die Diffusionsbarriere definiert (100 cm²). In den blauen Bereichen verhindert entweder Siliziumnitrid oder eine druckbare Paste die Eindiffusion von Phosphor und trennt so p- von n⁺-Bereichen. Die Busbars sind extra schmal ausgeführt (Emitterbusbar in der Zellmitte). Der Fingerabstand beträgt 2,4 mm, der Emitterrückseitenanteil 42 %.

In Verbindung mit dem optischen Kantenerkennungssystem des Siebdruckers wurde von 25 cm^2 auf 100 cm^2 Zellfläche übergegangen (Fig. 54). Um Justierschwierigkeiten auszuschließen, wurde zum Druck der 100 cm^2 EWT-Zellen ein Fingerabstand von 2,4 mm gewählt. Die Basisbusbars wurden sehr schmal ausgeführt (1 mm) und an den Zellrand verlegt. Der Emitterbusbar ist ebenfalls schmal gehalten (2 mm) und in der Zellmitte angeordnet, so daß die Finger jeweils 4,5 cm lang sind.

4.4.2 Fingerabstand und Serienwiderstand, Breite der Busbars

Der optimale Fingerabstand (Abstand zwischen zwei Emitterfingern) von EWT-Zellen wird hauptsächlich vom Serienwiderstand vorgegeben. Bei großem Fingerabstand (4,5 mm) steigt der Serienwiderstandsanteil im Frontemitter, bei zu geringem Fingerabstand (1,3 mm) können die Finger nicht mehr ausreichend breit ausgeführt werden. Je nach Frontemitterschichtwiderstand liegt der optimale Fingerabstand bei etwa 2 mm, so konnte mit $\rho_{\text{front}} = 7 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ ein Gesamtserienwiderstand von nur $0,8 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ gemessen werden. Der Serienwiderstandsbeitrag innerhalb der Verbindungslöcher kann durch starke Diffusion (7 - 15 Ω/sqr) reduziert werden. In Fig. 55 sind die bei verschiedenen Fingerabständen gemessenen Serienwiderstände aufgetragen. Dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß sich die Gridgeometrie mit 1,8 mm Fingerabstand von den drei anderen durch breitere Basisbusbars unterscheidet (Fig. 52 und Fig. 53).

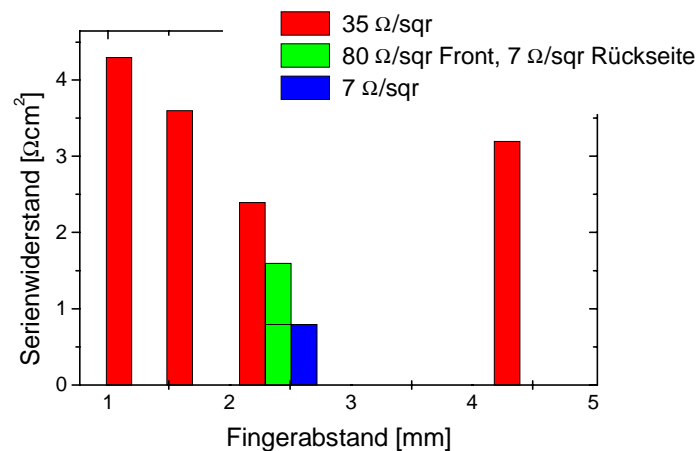


Fig. 55: Experimentell ermittelte Werte für den Serienwiderstand in Abhängigkeit vom Fingerabstand und mit dem Emitterschichtwiderstand als Parameter. Bei 2,4 mm Fingerabstand wurde der geringste Wert für R_{serie} gemessen.

Um den Einfluß der Busbarbereiche abzuschätzen wurden Teilbereiche einer EWT-Zelle mit DESSIS_{TM} simuliert. Dabei stellte sich heraus, daß der Füllfaktor im Bereich des Basisbusbars mit steigenden Frontemitterschichtwiderstand schnell abnimmt und selbst bei 35 Ω/sqr Emitterschichtwiderstand fünf Prozentpunkte unter dem Füllfaktor in den Fingerbereichen liegt (Fig. 56). Der Flächenanteil der Busbars ist zwar mit 10 % der Gesamtfläche gering, jedoch zeigt die Berechnung mit PC1D, daß sich der Zellwirkungsgrad aufgrund der Busbars um einen Prozentpunkt verringert (Fig. 57).

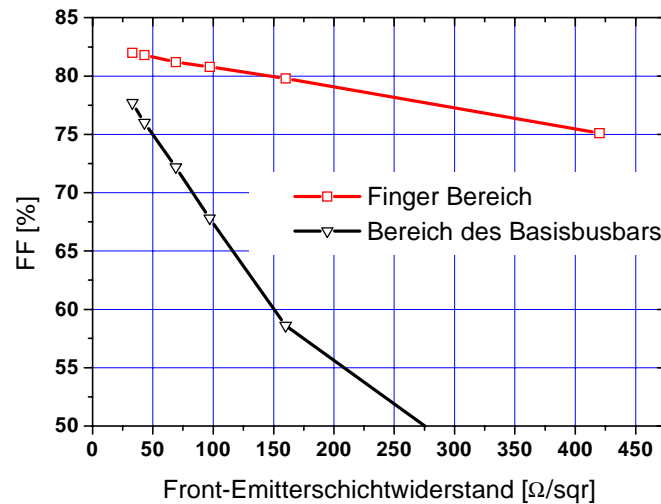


Fig. 56: DESSIS_{TM} Simulation des Füllfaktors in Abhängigkeit vom Emitterschichtwiderstand. Die obere Kurve (rot) gilt im Bereich der Finger (Fingerabstand $d = 2,4$ mm), die untere Kurve (schwarz) im Bereich des Basisbusbars (Entfernung D zum ersten Verbindungsloch $2,6$ mm).

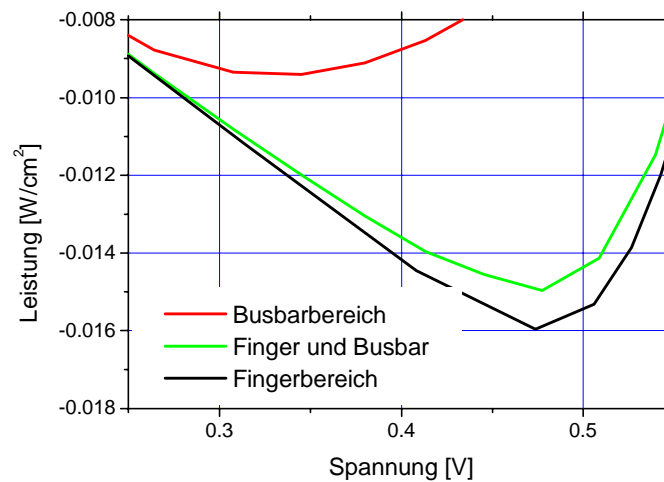


Fig. 57: Einfluß der Busbarbereiche auf die Leistungskurve der Zelle. Obwohl die Busbarbereiche nur ein Zehntel der Gesamtfläche bedecken, verringern sie den Zellwirkungsgrad um einen Prozentpunkt.

Daher sind Überlegungen, wie auf Busbars gänzlich verzichtet werden könnte, durchaus berechtigt. Bei Verzicht auf Busbars im Griddesign könnten alle Finger über die ganze Zelle laufen. Falls eine geeignete Lösung gefunden wird, die Finger untereinander zu verbinden, würde sich die effektive Fingerlänge und damit auch der Serienwiderstandsbeitrag der Finger entsprechend reduzieren lassen.

4.4.3 Anzahl der Verbindungslöcher

Eine Variation der Zahl der Lochreihen pro Finger und des Lochabstandes entlang der Finger ergab keine signifikante Verbesserung des Serienwiderstandes (vgl. Tabelle 4-11). Bei $7 \Omega/\text{sqr}$ Emitterschichtwiderstand innerhalb der Löcher berechnet sich der Serienwiderstandsanteil der Löcher zu $35 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei einer Lochreihe pro Finger. Eine Verringerung dieses Wertes fällt bei einem Gesamtserienwiderstand von über $1 \Omega\text{cm}^2$ nicht ins Gewicht. Selbst bei einem Emitterschichtwiderstand von $35 \Omega/\text{sqr}$ (Anteil Löcher an $R_{\text{serie}} = 0,13 \Omega\text{cm}^2$) ist es fraglich, ob der Aufwand einer Verdoppelung oder Verdreifachung der Lochzahl den geringen Gewinn (Lochzahl geht linear ein) beim Serienwiderstand rechtfertigt.

Tabelle 4-11: Serienwiderstand in Abhängigkeit der Zahl der Lochreihen pro Finger und des Lochabstandes entlang eines Fingers. (Experimentell ermittelte Werte, Emitterschichtwiderstand innerhalb der Löcher $7 \Omega/\text{sqr}$).

Zahl der Lochreihen	Lochabstand [mm]	$R_{\text{serie}} [\Omega\text{cm}^2]$
1	0,5	1,2
1	0,8	1,0
2	1,0	1,0
3	1,0	1,1

Wegen des Zeitaufwandes zum Bohren der Verbindungslöcher wurde daher bei nachfolgenden Untersuchungen auf mehrere Lochreihen verzichtet und ein Lochabstand von 0,8 mm gewählt.

4.5 Basismetallisierungspaste, Frontseitentexturierung

4.5.1 Vergleich von Al und Al/Ag Paste für den Basiskontakt

Für die Metallisierung des Basiskontaktes standen zwei verschiedene Siebdruckpasten zur Verfügung, eine mit hohem Aluminiumanteil (Paste B) und eine mit hohem Silberanteil und nur 2 % Aluminium (Paste A). Bei konventionellen Zellen können mit Paste B deutlich höhere Wirkungsgrade (etwa 1 % absolut) erzielt werden. Auch bei EWT-Zellen könnte man aus den LBIC Messungen in Fig. 58 und Fig. 59 schließen, daß reine Al-Paste der Verwendung von Al/Ag-Paste überlegen ist: Bei Ag/Al-Metallisierung ist die Quantenausbeute im Basisbereich 15 % geringer als im Bereich mit rückseitigem Emitter, bei Al-Metallisierung beträgt der Unterschied nur 7 %.

Der Linienscan senkrecht zu den Fingern zeigt sogar einen leichten Anstieg in der Mitte der Al-Finger (Fig. 59), der auf einen BSF-Effekt zurückzuführen sein könnte. In der LBIC Messung ist der mittlere Strom der mit reiner Aluminiumpaste bedruckten Zelle kleiner als der Strom der Zelle mit Ag/Al-Paste; unter dem Sonnensimulator wurde jedoch an beiden Zellen der gleiche Kurzschlußstrom gemessen.

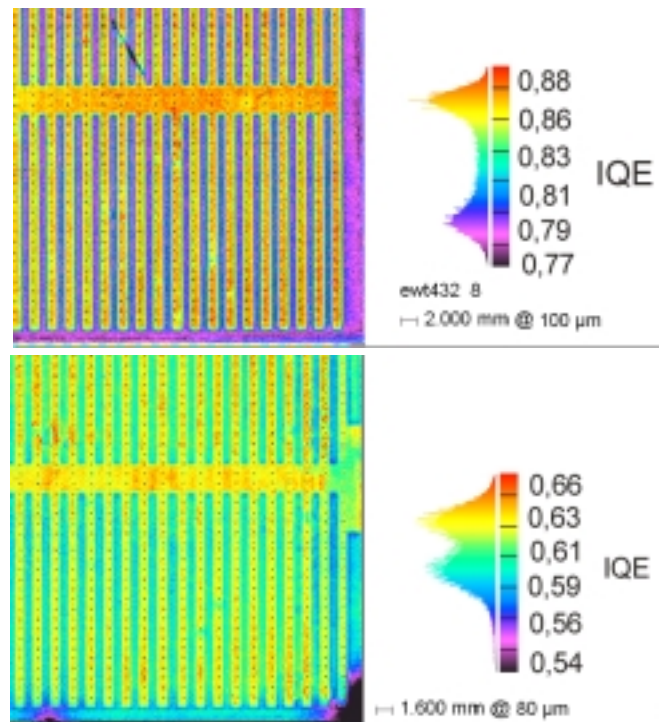


Fig. 58: LBIC Messung zweier EWT-Zellen mit unterschiedlicher Basismetallisierung bei $\lambda = 905$ nm. Oben wurde Al/Ag-Paste mit einem Al-Anteil von 2 % verwendet, unten reine Al-Paste. Der Unterschied in der Quantenausbeute zwischen rückseitigem n^+ - und p -Bereich ist bei Verwendung der Al-Paste weniger ausgeprägt.

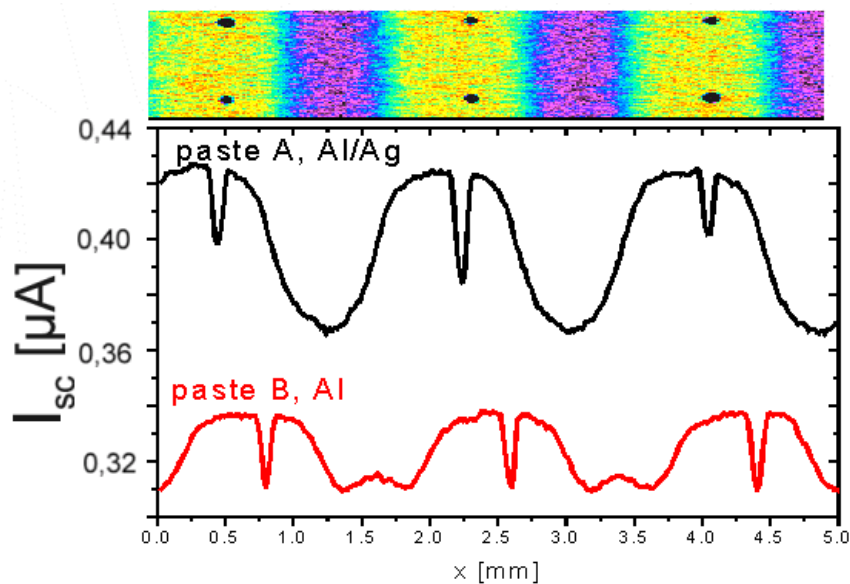


Fig. 59: Linienscan zweier EWT-Zellen mit unterschiedlicher Basismetallisierung. Trotz der geringen Eindringtiefe ($30 \mu\text{m}$) des Meßlichts (905 nm, Beleuchtung von der Vorderseite) ist die erhöhte Einsammelwahrscheinlichkeit aufgrund des rückseitigen Emitters zu erkennen (gelbe Fläche im oberen Bild). Der Einbruch im Strom in der Mitte der Emitterfinger stammt von den Verbindungslöchern, in denen kein Strom generiert wird. Bei der Zelle mit der aluminiumreichen Paste B ist der Unterschied zwischen Basis und Emitterbereichen geringer als bei der Zelle mit Paste A, was auf die BSF Wirkung des Aluminiums zurückzuführen sein könnte.

Der Vergleich der Reflexion von ganzflächig metallisierten Wafern zeigt, daß der Unterschied nicht durch unterschiedliche Reflexion an der Rückseitenmetallisierung verursacht wird (Laserwellenlänge von 905 nm, Fig. 60). Um zu prüfen, ob sich der bei der LBIC Messung beobachtete Unterschied im gesamten Spektrum wiederfindet, wurden Zellen ohne Verbindungslöcher hergestellt, bei denen die Kontaktseite beleuchtet wurde (Fig. 61).

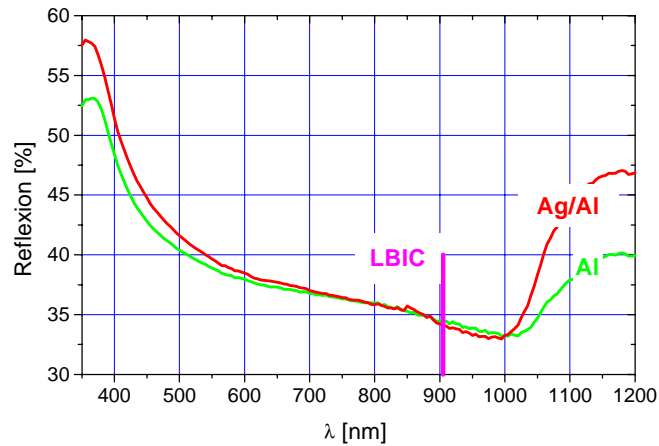


Fig. 60: Reflexionsmessung an zwei Siliziumwafern mit unterschiedlicher Rückseitenmetallisierung. Bei der bei der LBIC-Messung verwendeten Laserwellenlänge von 905 nm ist kein Unterschied in der Reflexion festzustellen. Die unterschiedliche Rückseitenreflexion scheidet also als Ursache für die verschiedenen IQE-Messungen aus.

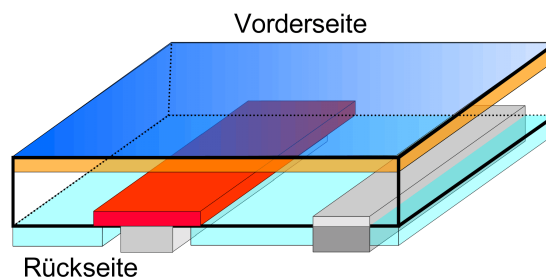


Fig. 61: Schema einer Zelle ohne Verbindungslöcher, an der der Einfluß der Basismetallisierungspaste experimentell untersucht wurde.

Obwohl die LBIC Messungen (Fig. 58 und Fig. 59) bei Verwendung von reiner Aluminiumpaste (anstatt Silberpaste mit 2 % Al-Anteil) für die Basismetallisierung einen geringeren Unterschied in der Quantenausbeute zwischen Basis- und Emitterbereichen zeigen, konnte über die ganze Zelle gemittelt keine Verbesserung bei Verwendung der Al-Paste festgestellt werden. Dabei wurde unterschiedliche Rückseitenreflexion als Ursache durch eine Reflexionsmessung ausgeschlossen. Sowohl die IV-Kennlinien (Tabelle 4-12), als auch die IQE-Messungen bei Front- und Rückseitenbeleuchtung (Fig. 62 und Fig. 63) zeigen keinen Vorteil der Al-Paste gegenüber der Al/Ag-Paste. Die Ag/Al-Paste besitzt eine höhere Leitfähigkeit als reine Al-Paste und läßt sich problemlos verlöten, was vor allem für die Erhöhung der Leitfähigkeit der Busbars durch Auflöten von Kupferstreifen wichtig ist. In den meisten Untersuchungen wurde daher die Ag/Al-Paste verwendet.

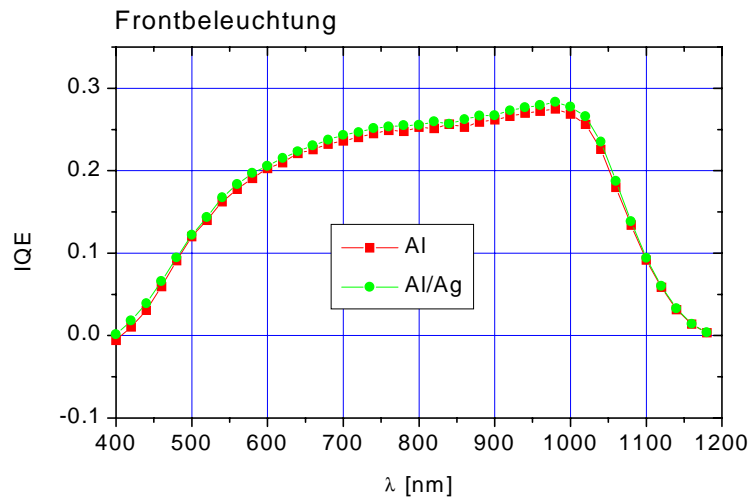


Fig. 62: IQE unter Frontbeleuchtung (kontaktlose Seite) von Paste A (Al/Ag) und Paste B (Al). Die beiden Kurven sind praktisch identisch, es zeigt sich kein BSF-Effekt und keine Getterwirkung aufgrund der Al-Paste.

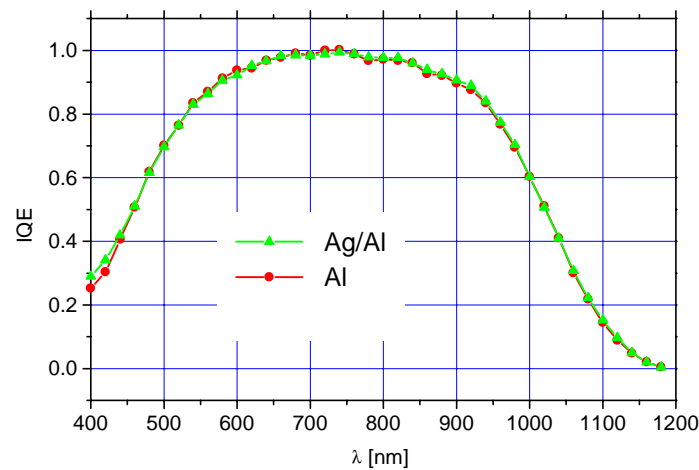


Fig. 63: IQE bei Beleuchtung der Rückseite (Kontakte). Eine verringerte Oberflächenrekombination durch Paste B (Al) kann nicht beobachtet werden.

Tabelle 4-12: Zellen mit unterschiedlicher Basismetallisierung; Die Zellen haben keine Verbindungslöcher, jedoch ein Rückseitengrid und wurden von der Kontaktseite beleuchtet. Die Al/Ag Paste ist für den Serienwiderstand offenbar vorteilhaft.

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{01} [10 ⁻¹² A/cm ²]	J_{02} [A/cm ²]	R_{shunt} [Ω cm ²]	R_{serie} [Ω cm ²]
2xAl/Ag	76,5	5,1	576	2,2	1,0	8*10 ⁻⁸	3800	1,0
1x Al/Ag	76,9	4,5	571	2,0	0,9	7*10 ⁻⁸	3800	1,3
Al	77,2	4,5	564	2,0	1,1	1,7*10 ⁻⁷	4200	1,6
Al+Ag	73,8	4,1	561	1,7	1,2	1,3*10 ⁻⁷	3800	1,5

4.5.2 Frontseitentexturierung

Die Reflexionsmessungen an drei Siliziumwafern mit unterschiedlicher Oberflächenbehandlung zeigen, wie wichtig die Texturierung der Oberfläche für die Einkopplung des Lichts in den Wafer ist (Fig. 64). Die beste Einkopplung über den ganzen – für die Solarzelle wichtigen Spektralbereich – wird durch alkalisches Texturätzen erzielt. Nach Abscheiden einer geeigneten Antireflexschicht beträgt die gewichtete Restreflexion 4 %. Multikristallines Silizium kann aufgrund der unterschiedlich orientierten Kristallite nicht gewinnbringend alkalisch texturiert werden. Durch mechanische Texturierung mit einer Texturierungswalze und anschließendes alkalisches Ätzen verringert sich die gewichtete Restreflexion immerhin von 10 % auf 6 %.

Diese Reflexionsminderung um 4 % führt zu einem Stromgewinn von ebenfalls 4 %. Selbst unter Berücksichtigung leichter Einbußen in V_{oc} (-10 mV) aufgrund der durch die Strukturierung vergrößerten Frontemitterfläche (+ 20 %) bedeutet eine resultierende relative Steigerung des Wirkungsgrades um 2 % eine Erhöhung von z. B. 16,0 % auf 16,3 %.

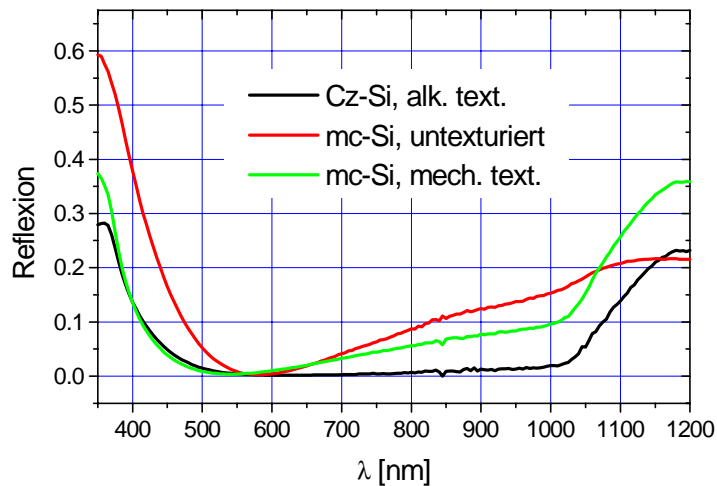


Fig. 64: Reflexionsmessungen an unterschiedlich behandelten Frontseiten (mit ARC). Die geringste Restreflexion hat der alkalisch texturierte monokristalline Wafer (4 % gewichtete Restreflexion). Durch die mechanische Texturierung läßt sich die Reflexion eines multikristallinen Wafers von 10 % auf 6 % reduzieren.

4.6 Multikristallines Silizium

Für die Prozeßevaluierung wurde bisher Cz-Silizium verwendet, um Ergebnisstreungen durch unterschiedliche Materialqualität zu vermeiden. Aufgrund der Annahme, daß der größte Vorteil des EWT-Konzepts erzielt werden kann, wenn die Basisdiffusionslänge etwa der halben Zelldicke entspricht, wird in diesem Abschnitt untersucht, ob der Prozeß auch für die Herstellung multikristalliner Solarzellen geeignet ist. Die alkalische Texturierung wird durch mechanisch erzeugte V-Gräben ersetzt und die Eignung von Wasserstoff für die Volumenpassivierung geprüft.

4.6.1 Mechanisch texturierte EWT-Zellen für ein Minimodul

Für ein Präsentationsminimodul wurden fünf mechanisch texturierte Wafer aus multikristallinem Silizium zu EWT-Zellen prozessiert. Nachdem die Wafer mechanisch mit einer Walze texturiert worden waren, wurde bei BP Solar in Madrid der Frontemitter diffundiert und ein LPCVD Siliziumnitrid zum Schutz der Frontseite und als Antireflexschicht abgeschieden. Laserbohren der Löcher, Druck und Feuern der Diffusionsbarriere und eine zweite Diffusion folgten. Abschließend wurden zuerst die Emitter, dann die Basisfinger gedruckt und beide Grids gemeinsam gefeuert (vgl. Prozeß in Fig. 68 mit mechanischer Walzentexturierung statt alkalischem Texturätzen). Die SiN ARC Schicht war nach der zweiten Diffusion 90 nm statt 70 nm dick. Die dadurch höhere Reflexion konnte jedoch durch Plasmaätzen noch etwas verringert werden, was sich als J_{sc} -Erhöhung von 1,0 - 2,5 mA/cm² auswirkte, so daß Kurzschlußströme zwischen 35,3 mA/cm² und 35,8 mA/cm² erreicht wurden. Dies ist für Zellen aus multikristallinem Silizium ein ungewöhnlich hoher Wert [8].

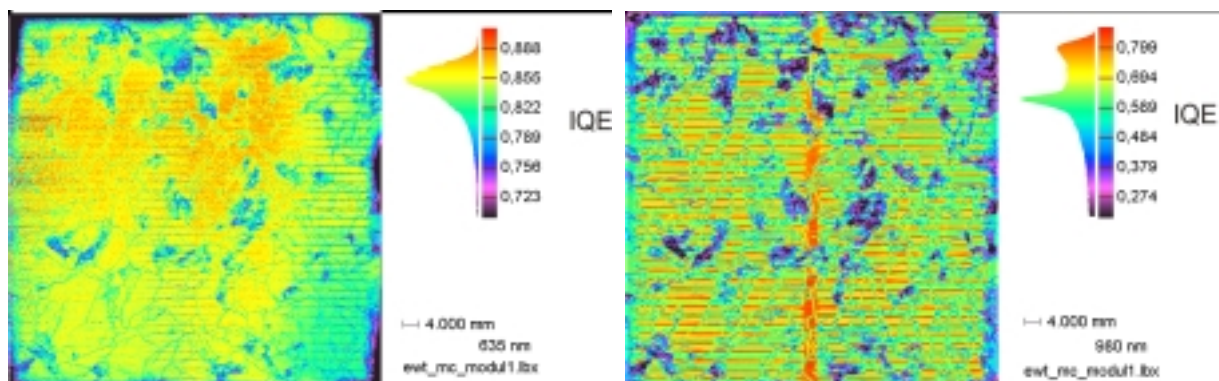


Fig. 65: LBIC Messung einer multikristallinen EWT-Zelle (Zellfläche 100 cm²) unter Frontseitenbeleuchtung bei 635 und 980 nm. Die Eindringtiefe bei 980 nm beträgt 100 µm (rechtes Bild). Obwohl die Zelle 300 µm dick ist, kann man deutlich die pn-Struktur auf der Zellrückseite erkennen. Eine geringere Quantenausbeute ist an Korngrenzen und Bereichen niedriger Qualität (blau) festzustellen. Bei 635 nm beträgt die Eindringtiefe nur 5 µm, das LBIC Signal wird folglich vom Frontemitter dominiert (linkes Bild). Am Rand ist das Signal vermutlich aufgrund des teilweise geschädigten Zellrandes verringert.

Auflöten von verzinnnten Kupferstreifen auf die schmalen Busbars erhöhte den Füllfaktor teilweise beträchtlich (von 57 auf 63 %). V_{oc} (576 mV) wurde von J_{01} ($4,5 \cdot 10^{-12}$ A/cm²)

ebenso wie von J_{02} ($1,7 \cdot 10^{-7}$ A/cm²) limitiert. Die 4 EWT-Zellen, die im Modul Verwendung fanden, erreichten Wirkungsgrade zwischen 11,9 und 13,2 %. Ein Bild des fertigen Modules findet sich in Kapitel 6.

Im LBIC Bild einer EWT-Zelle aus multikristallinem Silizium ist zu sehen, daß ein Teil der Kristallite kaum zum LBIC Signal beiträgt (Fig. 65). Die Berechnung der effektiven Diffusionslänge zeigt, daß L_{eff} in diesen Bereichen deutlich kleiner ist als auf dem übrigen Wafer (Fig. 67 oben). Bei wasserstoffpassivierten konventionellen Zellen aus demselben Siliziumblock waren die Unterschiede zwischen einzelnen Kristalliten weniger ausgeprägt (Fig. 67 unten).

4.6.2 Untersuchungen zur Wasserstoffpassivierung

Die Ladungsträgerlebensdauer in multikristallinem Silizium kann durch Volumenpassivierung mit Wasserstoff deutlich erhöht werden, wie sich bereits in vielen Studien gezeigt hat [117, 118]. Bei konventionellen Zellen wird der Wasserstoff entweder durch Abscheiden einer PECVD SiN-Schicht oder in einer plasmaunterstützten Wasserstoffpassivierungsanlage (MIRHP, Microwave Induced Remote Hydrogen plasma Passivation [117]) bereitgestellt. Das im vorigen Prozeß verwendete LPCVD SiN enthält nur einen geringen Anteil an Wasserstoff, daher wurde auch die Verwendung von PECVD SiN untersucht.

4.6.2.1 Homogener 7 Ω /sq Emitter mit PECVD Siliziumnitrid und MIRHP

Als Voruntersuchung wurde ein einfacher Prozeß ohne Zwei-Stufen-Emitter durchgeführt. In multikristalline Wafer (Zellfläche 100 cm²) wurden die Verbindungslöcher gelasert und nach Sägeschadenätzen die Diffusionsbarriere aufgedruckt, getrocknet und gefeuert. Nach der homogenen Diffusion (Emitterschichtwiderstand 7 Ω /sq) wurden die Wafer mit PECVD SiN auf der Frontseite beschichtet. Die starke Diffusion wurde gewählt, um zu prüfen, ob auch multikristalline Wafer die hohe Diffusionstemperatur ohne Degradation aushalten. Ein Teil der Zellen wurde 90 min lang einem Wasserstoffplasma (MIRHP-Wasserstoffpassivierungsanlage) ausgesetzt. Um die Ausdiffusion des Wasserstoffs beim Feuern der Kontakte zu verhindern, wurde die Zellrückseite bei einem Teil der Wafer anschließend ebenfalls mit PECVD Siliziumnitrid beschichtet. Die Kontakte wurden aufgedruckt und gefeuert, wobei die Zellen mit Rückseiten-SiN bei höherer Temperatur gefeuert wurden.

Bei der IV-Auswertung zeigte sich kein Unterschied zwischen Zellen mit und ohne MIRHP-Behandlung, auch das auf der Rückseite abgeschiedene Siliziumnitrid hatte keinen sichtbaren Einfluß auf V_{oc} oder den Kurzschlußstrom. Zellen, bei denen die Kontakte durch die Siliziumnitridschicht durchgefeuert werden mußten (höhere Feuertemperatur), hatten sowohl niedrige Shuntwiderstände ($R_{shunt} < 100 \Omega\text{cm}^2$) als auch hohe Serienwiderstände ($R_{serie} > 5 \Omega\text{cm}^2$). Beides zusammen deutet auf ungeeignete Feuerparameter hin. – Zellen, deren Rückseiten erst *nach* Drucken und Trocknen der Kontakte (aber *vor* dem Feuern) mit Siliziumnitrid bedeckt wurden, hatten sowohl hohe Shuntwiderstände ($R_{shunt} > 1000 \Omega\text{cm}^2$) als auch die üblichen Serienwiderstände ($R_{serie} = 1,4 - 1,7 \Omega\text{cm}^2$). Aus der Leerlaufspannung ($V_{oc} = 586$ mV) läßt sich schließen, daß die Siliziumnitridschicht auf der Vorderseite für die Bulkpassivierung des multikristallinen Silizium ausreicht (Tabelle 4-13) und zusätzliche Wasserstoffbehandlung offenbar nicht zu einer weiteren Lebensdauererhöhung und dadurch gesteigerter Leerlaufspannung führt. J_{01} und J_{02} liegen mit $2,5 \cdot 10^{-12}$ A/cm² (bzw.

$5 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) sehr nahe bei den Werten, die auch von EWT-Zellen aus einkristallinem Silizium (Cz) erreicht werden.

Tabelle 4-13: Multikristalline EWT-Zellen mit homogenem $7 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Emitter (daher der geringe Kurzschlußstrom) und PECVD Siliziumnitrid auf der Frontseite.

Zelle	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{01} [10 ⁻¹² A cm ⁻²]	J_{02} [10 ⁻⁸ A cm ⁻²]	R_{shunt} [Ωcm^2]	R_{serie} [Ωcm^2]
mc EWT	73,2	23,8	586	10,2	2,5	4,8	1100	1,4

4.6.2.2 mc EWT-Zellen mit Zwei-Stufen-Emitter und Wasserstoffpassivierung

Der erfolgreiche Einsatz von PECVD Siliziumnitrid zur Volumenpassivierung sollte auch auf EWT-Zellen mit Zwei-Stufen-Emitter übertragen werden. Bei diesem Prozeß (Fig. 68) wird die Siliziumnitridschicht auf der Vorderseite während der zweiten Diffusion so hohen Temperaturen ausgesetzt, daß der enthaltene Wasserstoff ausdiffundiert. Daher wurde vor dem Drucken der Kontakte eine zweite PECVD Schicht auf der Frontseite abgeschieden.

Der Prozeß verlief wie folgt: Multikristalline Wafer wurden diffundiert (POCl_3 , Emitterschichtwiderstand $90 \text{ } \Omega/\text{sqr}$), die Frontseite anschließend mit PECVD Siliziumnitrid geschützt. Nach Lasern der Verbindungslöcher wurde der Laserschaden zusammen mit dem rückseitigen Emitter entfernt. Drucken, Trocknen und Feuern der Diffusionsbarriere folgte. In einer zweiten Diffusion wurde die Waferrückseite und das Innere der Verbindungslöcher mit Emitter bedeckt. Im folgenden Prozeßschritt wurde die SiN-Schicht auf der Vorderseite bei einem Teil der Wafer entfernt (Plasmaätzter) und erneut PECVD Siliziumnitrid abgeschieden, um den im PECVD-SiN enthaltenen Wasserstoff während dem Feuern der Kontakte zur Bulkpassivierung zu nutzen. Abschließend wurden die Kontakte gedruckt, getrocknet und gefeuert.

Bei der IV-Auswertung war kein Unterschied zwischen den unterschiedlich prozessierten Zellen festzustellen. Alle Zellen befanden sich auf gleich niedrigem Niveau, J_{01} war 4 - 5 mal größer als gewöhnlich, V_{oc} entsprechend gering (510 - 550 mV). Eine Volumenpassivierung war nicht zu sehen, die IQE Messung (Fig. 66) deutet sogar eher daraufhin, daß die Volumenlebensdauer äußerst gering ist. Trotz des hochohmigen Frontemitters und der Oberflächenpassivierung mit Siliziumnitrid war die Quantenausbeute im Kurzwelligen nur bei einer Zelle annähernd erwartungsgemäß hoch. Die fehlende Stromgeneration im langwelligen Teil des Spektrums machte sich auch im kleinen Kurzschlußstrom von $J_{sc} < 32,5 \text{ mA/cm}^2$ bemerkbar (Gleichung 3-6). Der Wirkungsgrad war mit 9 % sehr niedrig, wobei die Ursache dafür nicht ganz geklärt ist. PECVD SiN wurde oft als Diffusionsbarriere eingesetzt, so daß davon ausgegangen werden kann, daß es sich auch zum Schutz des Frontemitters bei der zweiten Diffusion eignet. Auch die hohe Temperaturbelastung der Wafer während der zweiten Diffusion scheidet als Erklärung aus, nachdem im vorigen Prozeß die gleiche Temperatur verwendet wurde, die Leerlaufspannung der Zellen dort aber deutlich höher war. Als Ursache für dieses unerwartet schlechte Ergebnis kommt im Grunde nur eine sehr geringe Qualität des verwendeten Siliziums in Betracht.

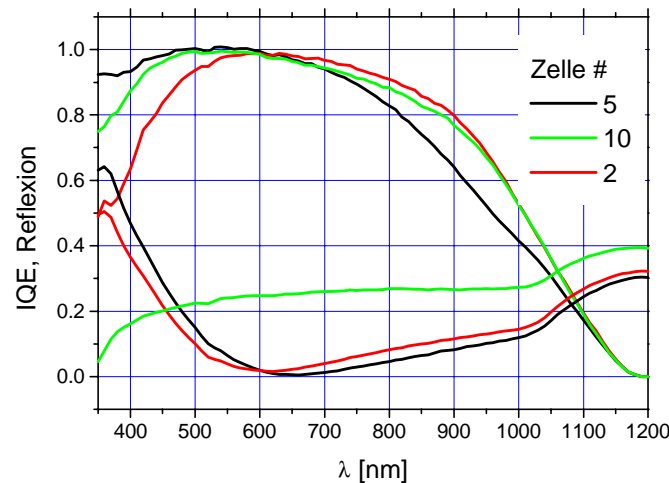


Fig. 66: IQE und Reflexionsmessung von drei EWT-Zellen aus multikristallinem Silizium mit PECVD Siliziumnitrid. Der flache Abfall zwischen 800 nm und 1000 nm zeigt, daß die Minoritätsladungsträgerlebensdauer ungewöhnlich klein ist. Zwischen 350 nm und 500 nm zeigt nur Zelle #5 die für hochohmige Emitter und Oberflächenpassivierung erwartete hohe IQE. Die Siliziumnitridschicht von Zelle #10 ist zu dünn, das Reflexionsminimum liegt deshalb bei 300 nm.

4.6.2.3 Wasserstoffpassivierung (MIRHP) vor dem Drucken der Kontakte

Der für die Herstellung der Zellen für das mc-Minimodul verwendete Prozeß wurde um einen Schritt erweitert: Vor dem Drucken der Kontakte wurden die Wafer in der Wasserstoffpassivierungsanlage passiviert. Obwohl damit zu rechnen war, daß beim Feuern der Kontakte ein Großteil des Wasserstoffs wieder aus dem Wafer ausdiffundiert [19], waren Leerlaufspannung und Wirkungsgrad höher als ohne Wasserstoffpassivierung (Tabelle 4-14) [119].

Tabelle 4-14: Multikristalline EWT-Zellen mit Zwei-Stufen-Emitter und Wasserstoffpassivierung (MIRHP) vor dem Drucken der Kontakte [119].

Zelle	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{01} [10 ⁻¹² A/cm ²]	J_{02} [10 ⁻⁸ A/cm ²]	R_{shunt} [Ωcm ²]	R_{serie} [Ωcm ²]
mc EWT (MIRHP)	67,1	35,9	584	14,0	3,6	9,3	1500	1,7
mc EWT	63,8	35,8	576	13,2	4,5	17	800	1,8

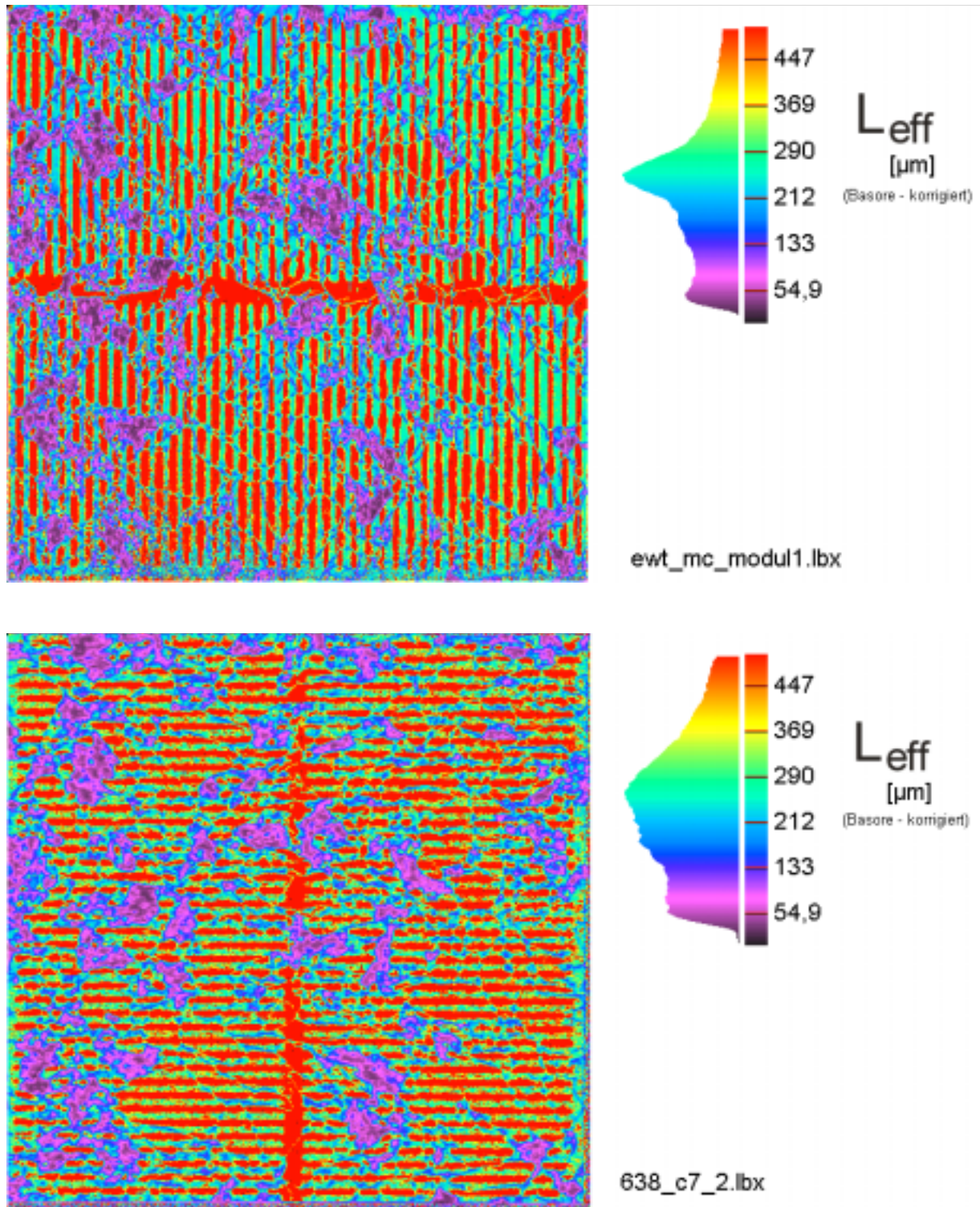


Fig. 67: Die untere Zelle wurde 90 min lang in der MIRHP-Anlage passiviert, bevor die Kontakte aufgedruckt wurden. Es sind weniger Bereiche mit $L_{eff} < 50 \mu\text{m}$ zu sehen. Der Mittelwert für L_{eff} beträgt $220 \mu\text{m}$ bei der passivierten Zelle und $200 \mu\text{m}$ bei der unpassivierten Zelle [120]. Die Orientierung entspricht der Kornstruktur und nicht der Lage der Kontakte.

4.7 Erfolgreichster Prozeß

Der aufgrund der vorangehend beschriebenen Untersuchungen erfolgreichste Prozeß zur industriell anwendbaren Herstellung von EWT-Zellen ist schematisch in Fig. 68 dargestellt

(vgl. auch Tabelle 4-15). Die Frontseite der Wafer wird texturiert, um die Restreflexion gering zu halten und um zusammen mit dem hochwertigen oberflächenpassivierten Frontseitenemitter eine hohe Quantenausbeute und einen hohen Kurzschlußstrom sicherzustellen. Der Frontseitenemitter wird durch ein LPCVD SiN passiviert und durch diese Schicht auch während der folgenden Prozeßsequenz vor Beschädigung und Verunreinigung geschützt.

Die Verbindungslöcher (Durchmesser 60 - 80 μm) werden mittels Laser erstellt, eine Lochreihe pro Finger mit Lochabstand 0,8 mm genügt. Der beim Lasern entstandene Sägeschaden wird in einem alkalischen Ätzbad entfernt. Anschließend wird mittels Siebdruck eine dünne maskierende Schicht aufgedruckt und gefeuert, die während der folgenden starken Diffusion die Eindiffusion von Phosphor in einem schmalen 200 μm breiten Streifen zwischen dem späteren Basis- und Emitterbereich verhindert. Die starke Diffusion stellt eine gute elektrische Leitfähigkeit innerhalb der Verbindungslöcher sicher.

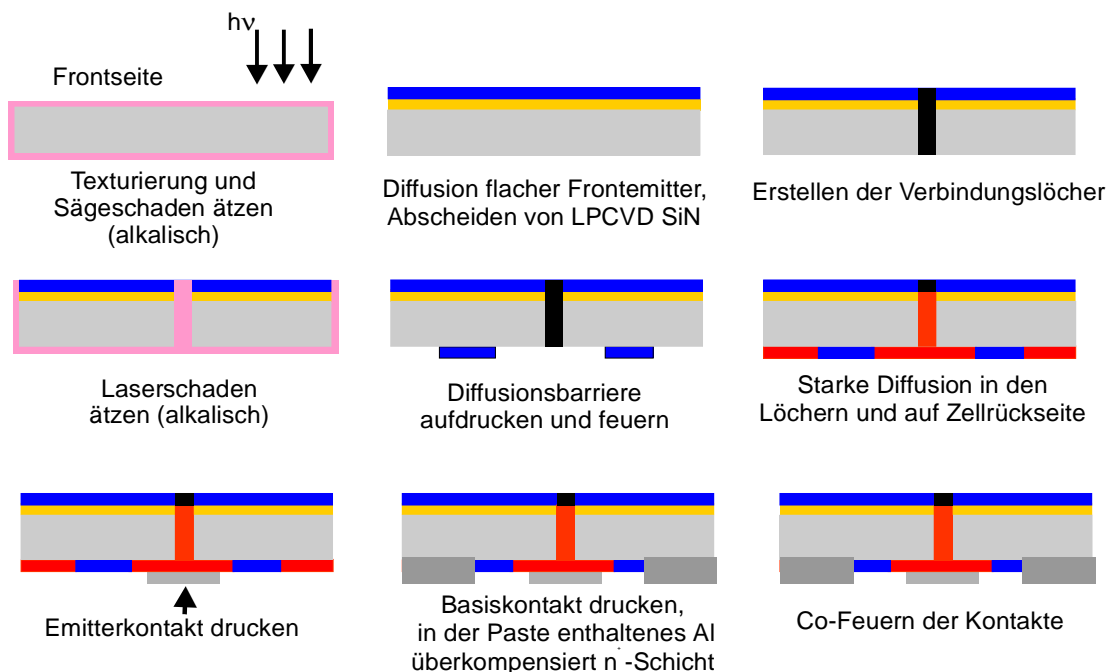


Fig. 68: Erfolgreichster Prozeß zur Herstellung von EWT-Zellen mit Siebdruckmetallisierung. Die wichtigsten Merkmale sind die Fronttextur, die zwei Diffusionsschritte, und die Trennung von p- und n-Bereich mittels siebgedruckter Diffusionsbarriere.

Zum Abschluß werden die metallischen Kontakte gedruckt, zuerst der Emitterkontakt unter Verwendung einer reinen Ag-Paste, anschließend der Basiskontakt unter Verwendung einer Ag/Al-Paste mit 2 % Aluminiumanteil. Der Aluminiumanteil bewirkt, daß die im Basisbereich eindiffundierten Phosphoratome überkompensiert werden und ein guter Kontakt zum p-Silizium hergestellt wird. Beide Kontaktgrids werden in einem gemeinsamen Feuerschritt bei 800 °C im Gürtelofen gefeuert. Bei der Wahl der Gridgeometrie ist zu beachten, daß die von Busbars bedeckte Fläche gering ist und der Fingerabstand nicht größer als 2,4 mm gewählt wird.

Mit diesem Prozeß konnte auf EWT-Zellen aus 1 Ωcm Cz-Silizium mit einer Zellfläche von 100 cm^2 ein Wirkungsgrad von 15,8 % erzielt werden. Bei Verwendung von multikristallinem Silizium wird die alkalische Texturierung durch eine mechanisch erzeugte V-Texturierung

ersetzt und vor dem Drucken noch ein Schritt „Wasserstoffpassivierung“ (MIRHP-Anlage) eingefügt. Mit multikristallinem Silizium wurde ein Wirkungsgrad von 14 % erreicht.

Tabelle 4-15: Übersicht über die verschiedenen Prozeßsequenzen und die damit erreichten Wirkungsgrade (Cz-Silizium)

Verbindungs-löcher	pn-Bereichs-definition	Front/Rück-seitenemitter, ARC	Kapitel	Zellfläche [cm ²]	Wirkungsgrad [%]	V _{oc} [mV]
Säge	Emitter abfräsen	35, ohne	4.2.1	25	9,5	544
Säge	selbstjustiertes Plasmaätzen	35, mit	4.2.2.2	25	11,1	552
Laser	SiN als Diff.-Barriere	35, mit	4.2.3	25	13,6	592
Laser	SiN als Diff.-Barriere	35, mit	4.3.3	100	13,8	594
Laser	SiN als Diff.-Barriere	80/7, mit	4.2.3	100	16,1	599
Laser	Siebdruck Diff.-Barriere	80/7, mit	4.2.4	100	15,8	600

multikristallines Silizium, Verbindungslöcher gelasert

Passivierung	pn-Bereichs-definition	Front/Rück-seitenemitter, ARC	Kapitel	Zellfläche [cm ²]	Wirkungsgrad [%]	V _{oc} [mV]
ohne	Siebdruck Diff.-Barriere	80/7	4.6.1	100	13,2	576
PECVD SiN	Siebdruck Diff.-Barriere	7	4.6.2.1	100	10,2	584
MIRHP	Siebdruck Diff.-Barriere	80/7	4.6.2.3	100	14,0	584

5. Kapitel - Wirkungsgradoptimierung

In den vorigen Kapiteln wurde ein industriell anwendbarer Herstellungsprozeß für EWT-Zellen entwickelt, wobei vor allem technologische Aspekte berücksichtigt wurden. In diesem Kapitel soll untersucht werden, wieweit sich der bisher erzielte Wirkungsgrad noch steigern läßt und welche Maßnahmen dazu ergriffen werden müssen. Im ersten Abschnitt wird anhand eines Modells der Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung und dem für EWT-Zellen charakteristischen zusätzlichen Rückseitenemitter diskutiert. Dabei wird nach Rekombination im Volumen (J_{01}) und Rekombination im pn-Übergang (J_{02}) unterteilt. Es folgt ein Vergleich mit konventionellen Zellen und Berechnungen zur Optimierung der Gridgeometrie, die den Bogen zurück zur Prozeßtechnologie spannen. Anhand dieser Ergebnisse wird das Wirkungsgradpotential von EWT-Zellen abgeschätzt und Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit des EWT-Konzepts angestellt.

5.1 Einfluß des Rückseitenemitters auf die Leerlaufspannung

Alle bisher bekannten EWT-Zellen, die aus Silizium mit mittlerer Minoritätsträgerlebensdauer ($\tau = 7 - 50 \mu\text{s}$) hergestellt wurden, haben eine geringere offene Klemmenspannung als aufgrund von Materialqualität und Oberflächenpassivierung erwartet würde [11, 42, 47, 48, 121]. Bei Hocheffizienz-Rückkontakt- und Hocheffizienz-Bifacial-Zellen ($\tau > 1000 \mu\text{s}$ und $S < 500 \text{ cm/s}$) wird hingegen nicht von einer V_{oc} -Verringerung berichtet (vgl. auch Tabelle 1-1) [14, 24, 29, 30, 122].

Im Folgenden sollen mögliche konzeptbedingte Ursachen für die geringere Leerlaufspannung von EWT-Zellen untersucht werden. Dazu wird die Funktionsweise von EWT-Zellen mit dem Ziel erörtert, die Meßwerte der hergestellten Zellen zu erklären und eventuell den verwendeten Prozeß zu verbessern.

Neben der vergrößerten Emitterfläche (Beitrag zu J_{01} , Kapitel 5.1.2) und der Rekombination im an die Oberfläche angrenzenden pn-Übergang (Beitrag zu J_{02} , Kapitel 5.1.3) erklärt das Modell des unbeleuchteten Rückseitenemitters die Parallelschaltung zweier Solarzellen zur Hauptursache der verringerten offenen Klemmenspannung.

5.1.1 Modell des unbeleuchteten Rückseitenemitters

Das Modell des unbeleuchteten Rückseitenemitters beschreibt eine EWT-Zelle durch zwei parallelgeschaltete Solarzellensysteme und erklärt dadurch die niedrigere Leerlaufspannung von EWT-Zellen im Vergleich zu konventionellen Zellen (Fig. 69 und Fig. 70, nach [123], erweitertes Ebers-Moll-Modell [124]).

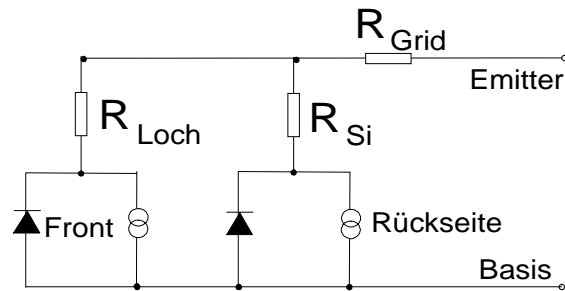


Fig. 69: Anschauliches Modell zur Erklärung der niedrigeren offenen Klemmenspannung bei EWT-Zellen (nach [123]). Das rechte Solarzellensystem symbolisiert den Frontemitter, das linke den Rückseitenemitter, beide sind über die gemeinsame Basis miteinander verbunden. Die im Frontsystem erzeugte Spannung wird über das weniger stark beleuchtete Rückseitensystem („Dunkler Emitter“) kurzgeschlossen. V_{oc} des Gesamtsystems ist daher niedriger als V_{oc} des Frontsystems alleine. Die Simulationen erfolgten mit PC1D (siehe Anhang).

Dabei ist dieses Modell nicht mit dem Zwei-Dioden-Modell zu verwechseln: Anders als beim Zwei-Dioden-Modell (Zwei Dioden unterschiedlicher Idealität) handelt es sich hier um zwei parallelgeschaltete Solarzellensysteme (Frontemitter und Rückseitenemitter) mit gleicher Idealität von denen eines nicht oder nur wenig beleuchtet wird (Rückseitenemitter).

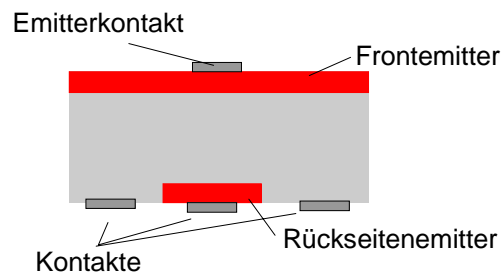


Fig. 70: Schema zum Modell des unbeleuchteten Rückseitenemitters. Bei EWT-Zellen sind Frontemitter und Rückseitenemitter durch die Verbindungslöcher elektrisch verbunden. In der Simulation wurden die IV-Kurven von Front- und Rückseitenemitter jeweils auch getrennt berechnet.

Da die offene Klemmenspannung vom Kurzschlußstrom abhängt und der Kurzschlußstrom wiederum von der Beleuchtungsintensität bestimmt wird, ist V_{oc} des Rückseitensystems kleiner als V_{oc} des Frontsystems (Fig. 71) – jedenfalls bei kleinen und mittleren Bulkdiffusionslängen (Fig. 72). Werden Rückseiten- und Frontsystem elektrisch verbunden, ist V_{oc} des Gesamtsystems folglich kleiner als V_{oc} des Frontsystems alleine (Fig. 71). Bei EWT-Zellen erfolgt diese Parallelschaltung durch die Verbindungslöcher. Das Modell in Fig. 69, das von zwei getrennten Systemen ausgeht, ist nur für Diffusionslängen kleiner als halbe Zelldicke gültig. Für größere Diffusionslängen beeinflussen sich die beiden Systeme gegenseitig. Die folgenden Berechnungen wurden mit PC1D durchgeführt, wobei das Gesamtsystem dadurch simuliert wurde, daß Front- und Rückseitenemitter über einen externen Widerstand verbunden wurden. PC1D bezieht die Wechselwirkung zwischen Front- und Rückseite automatisch mit ein. Der Anteil des Rückseitenemitters beträgt bei PC1D

100 % und muß bei Übertragung auf reale Zellen entsprechend umgerechnet werden (eindimensionale Simulation) .

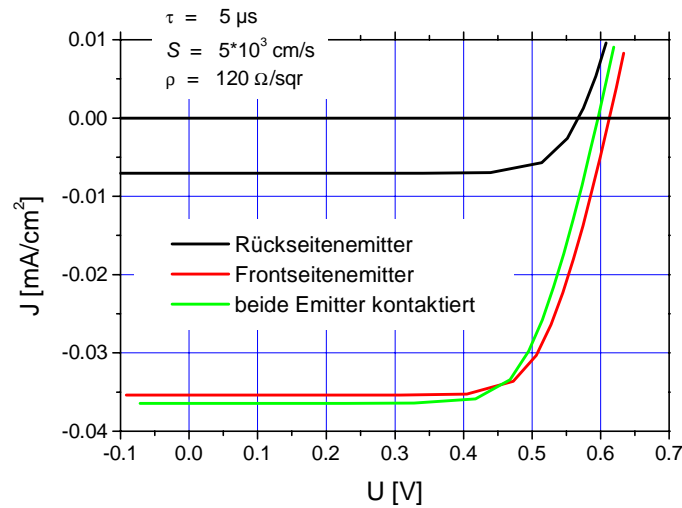


Fig. 71: IV-Kennlinien von Front- und Rückseitensystem nach Fig. 69 (Simulation PC1D [125]). Unter Frontbeleuchtung kommen am Rückseitenemitter (hellblau) weniger Ladungsträger an ($\tau = 20 \mu\text{s}$), J_{sc} ist entsprechend geringer - und damit auch V_{oc} . Bei Parallelschaltung von Front- und Rückseitenemitter steigt zwar J_{sc} des Gesamtsystems (grün), V_{oc} ist jedoch geringer als beim Frontsystem (rot) alleine.

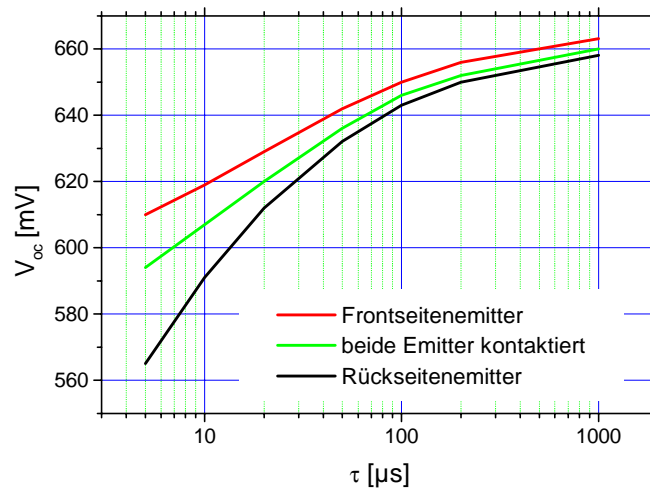


Fig. 72: Die offene Klemmenspannung hängt direkt mit dem Kurzschlußstrom und damit auch mit der Beleuchtungsintensität zusammen. Bei Frontbeleuchtung ist daher V_{oc} der Rückseitenzelle kleiner als V_{oc} der Frontseitenzelle (bei kleiner Volumenlebensdauer). Beträgt die Diffusionslänge im Volumen ein Vielfaches der Zelldicke stehen die generierten Ladungsträger an Front- und Rückseite in gleichem Maße zur Verfügung. Folglich verschwindet der Unterschied in V_{oc} ($S_r = S_f = 5 \cdot 10^3 \text{ cm/s}$).

Beträgt die Diffusionslänge ein Mehrfaches der Zelldicke und sind die Oberflächen sehr gut passiviert, so stehen die im Wafer generierten Ladungsträger ebenso dem Rückseitensystem zur Verfügung ($S < 100 \text{ cm/s}$ in Verbindung mit hochwertigem Emitter auf Vorder- und Rückseite mit $\rho_{\text{schicht}} = 185 \Omega/\text{sqr}$). Der Unterschied in J_{sc} verschwindet, damit verschwindet

auch der Unterschied in V_{oc} (Fig. 73). Die offene Klemmenspannung des Gesamtsystems (Front- und Rückseitenemitter verbunden) ist dann genauso groß wie die der Einzelsysteme.

Als Schlußfolgerung ergibt sich, daß die Reduzierung von V_{oc} durch den unbeleuchteten Rückseitenemitter bei kleinen Diffusionslängen ($\tau < 30 \mu\text{s}$) unvermeidlich ist und bei mittleren und großen Diffusionslängen durch sehr gute Oberflächenpassivierung ($S < 100 \text{ cm/s}$) verringert oder ganz vermieden werden könnte.

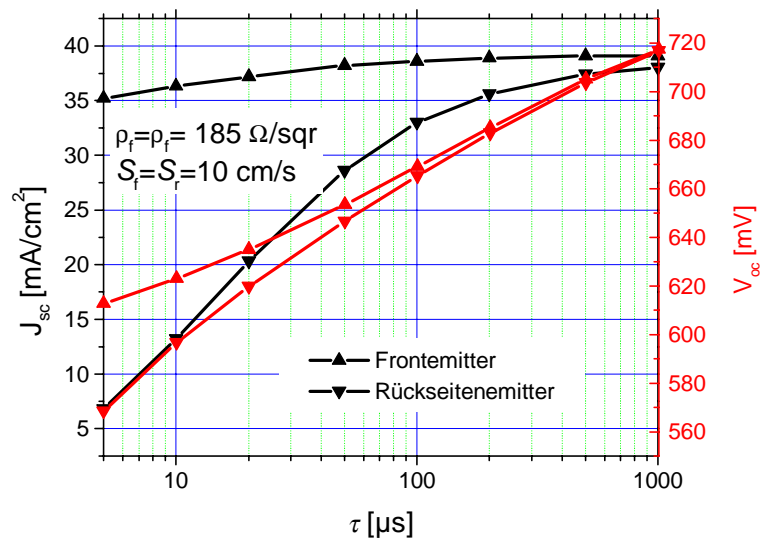


Fig. 73: Kurzschlußstrom (schwarz) und offene Klemmenspannung (rot) abhängig von der Basisdiffusionslänge jeweils für Front- und Rückseitenemitter aus Fig. 70. Ist die Bulklebensdauer groß genug ($\tau > 1000 \mu\text{s}$), können an der Rückseite genausoviel Ladungsträger eingesammelt werden wie an der Vorderseite (Simulation PC1D, $S_r = S_f = 10 \text{ cm/s}$, $\rho_r = \rho_f = 185 \Omega/\text{sqr}$).

5.1.2 Zwei-Dioden-Modell, Sättigungsstrom J_{01}

Als Verknüpfung zum Zwei-Dioden-Modell kann dabei folgende anschauliche Erklärung dienen: Im Zwei-Dioden-Modell wird die Leerlaufspannung von den Sperrsättigungsströmen J_{01} und J_{02} bestimmt (Gleichung 3-1). Ist die Diffusionslänge L geringer als die Waferdicke, so tragen nur die Elektronen zu J_{01} bei, die weniger als L vom Frontemitter entfernt sind – jedenfalls solange nur der Frontemitter kontaktiert wird (linkes Bild in Fig. 74). Wird jedoch der Rückseitenemitter mit dem Frontemitter verbunden (rechtes Bild in Fig. 74), so tragen zusätzlich die Elektronen aus dem Einzugsbereich des Rückseitenemitters zu J_{01} bei und die Leerlaufspannung der Zelle verringert sich entsprechend. Ist die Diffusionslänge größer als die Zelldicke, vergrößert sich J_{01} bei Hinzuschalten des Rückseitenemitters hingegen nicht.

Die Auswertung der IV-Kennlinien von EWT-Zellen zeigt, daß J_{01} bei den besten Zellen mit Zwei-Stufen-Emitter $2,0 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ beträgt, was zusammen mit $J_{02} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ einer Leerlaufspannung von 600 mV entspricht. Der hohe Wert von $2,0 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ kann nicht alleine durch den Emittersättigungsstrom aus dem zusätzlichen Rückseitenemitter erklärt werden, der unter Berücksichtigung des Emitterflächenanteiles nur $2,4 \cdot 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ zusätzlich beiträgt [126]. Nach obiger Überlegung wird durch einen zusätzlichen rückseitigen Emitter

nicht nur der Anteil des Emittersättigungsstromes an J_{0I} erhöht, sondern J_{0I} vergrößert sich auch um einen Volumenbeitrag.

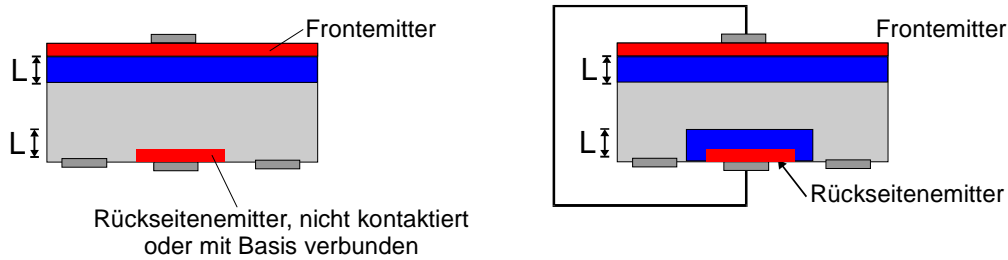


Fig. 74: Erhöhung von J_{0I} durch den Rückseitenemitter. Wird der Rückseitenemitter einer Zelle mit Transistorstruktur mit dem Frontemitter anstatt mit der Basis verbunden, trägt nicht nur der zusätzliche Emittersättigungsstrom zu J_{0I} bei, sondern auch diejenigen Elektronen in der Basis, die weiter als ihre Diffusionslänge L vom Frontemitter entfernt sind, die jedoch zum Rückseitenemitter gelangen können (blauer Bereich) [127].

Um die Simulationsergebnisse zu überprüfen, wurden Zellen ohne Verbindungslöcher mit Transistorstruktur hergestellt (ineinander verschachtelte Rückgrids wie bei EWT-Zellen und zusätzliches Emitterfrontgrid). Wurde der Rückseitenemitter mit dem Basiskontakt kurzgeschlossen (Fig. 74 links), betrug $J_{0I} = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$. Wurden Front- und Rückseitenemitterkontakte verbunden (Fig. 74 rechts), ergab sich $J_{0I} = 2,0 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ und eine entsprechend niedrigere Leerlaufspannung. Der Einzugsbereich des Rückseitenemitter beträgt unter Berücksichtigung einer Diffusionslänge von $180 \mu\text{m}$ etwa 52 %. Um diesen Betrag sollte sich nach der obigen Überlegung folglich auch J_{0I} bei Zuschalten des Rückseitenemitters erhöhen (gleicher Emitter auf Front- und Rückseite), was mit der Messung an der Transistorstrukturzelle auch tatsächlich übereinstimmt. Aus Gleichung 3-3 berechnet sich die V_{oc} -Verringerung aufgrund der Erhöhung von J_{0I} zu 10 mV (unabhängig von V_{oc}).

Tabelle 5-1: IV-Messung der Rückkontaktzelle ohne Löcher mit extra Frontemitterkontakt (Transistorstruktur)

	FF [%]	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [mV]	η [%]	J_{0I} [10 ⁻¹² A/cm ²]
nur Frontkontakt	65,7	21,1	598,8	8,3	1,3
Front und Rückkontakt	65,4	22,0	590,8	8,5	2,0

In Fig. 75 ist die IQE Messung der Zelle gezeigt. Der Vergleich der IQE wie auch der IV Messung zeigt, daß der Rückseitenemitter zur Ladungsträgereinsammlung beiträgt (J_{sc} steigt um $0,9 \text{ mA/cm}^2$), indem von langwelligem Licht an der Waferrückseite generierte Ladungsträger ebenfalls eingesammelt werden. Nach Gleichung 3-4 wäre aus der Erhöhung von L_{eff} auch eine um 10 mV höhere offene Klemmenspannung zu erwarten, was aber durch die IV-Messung nicht bestätigt wird. Jedoch ist die Auswertung der IQE von EWT-Zellen nach Gleichung 3-5 (Basore) durchaus fragwürdig; die Bedeutung des berechneten L_{eff} von $320 \mu\text{m}$ ist sicher nicht unmittelbar mit L_{eff} von konventionellen Zellen, für die die Herleitung

von Gleichung 3-5 erfolgte, zu vergleichen. Die Auswertung der IQE von L_{eff} unter Frontbeleuchtung (ohne rückseitigen Emittor) und unter Rückseitenbeleuchtung ergibt im Rahmen der Meßgenauigkeit denselben Wert ($L_{eff} = 180 \mu\text{m}$).

Aus der Rückseiten IQE bestimmt sich die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit der Rückseite nach Gleichung 3-7 zu $3 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$.

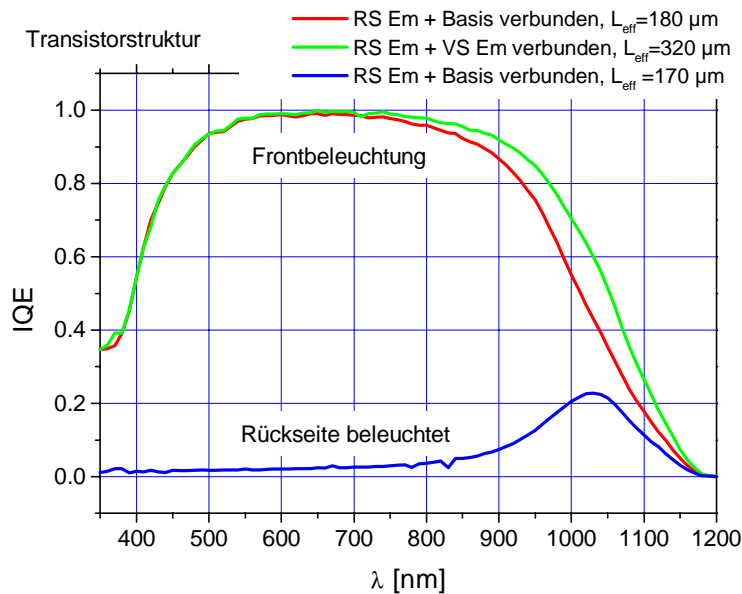


Fig. 75: IQE Messung einer Rückkontaktzelle ohne Verbindungslöcher mit zusätzlichem Frontemitterkontakt (Transistorstruktur) unter Front- bzw. Rückseitenbeleuchtung. Der rückseitige Emittor erhöht die Quantenausbeute im langwelligen Spektralbereich, so daß L_{eff} von $180 \mu\text{m}$ auf $320 \mu\text{m}$ und J_{sc} um 1 mA/cm^2 ansteigt.

Damit bestätigt sich auch experimentell, daß der zusätzliche Rückseitenemittor J_{01} erhöht und dadurch V_{oc} verringert. Die Verringerung stimmt auch quantitativ mit den Modellvorstellungen überein.

5.1.3 Rekombination am pn-Übergang, Sättigungsstrom J_{02}

Außer dem Sättigungsstrom J_{01} , der aus der Basis und dem Emittor stammt, ist für EWT-Zellen auch die Betrachtung von J_{02} , dem Sättigungsstrombeitrag aus dem pn-Übergang, von großer Bedeutung. J_{02} von EWT-Zellen ist aufgrund der größeren Emittorfläche (Front- und Rückseitenemittor) um den Flächenanteil des Rückseitenemittors höher als J_{02} von konventionellen Zellen. Jedoch erhöht sich J_{02} noch zusätzlich wegen des verschachtelten Rückgrids: Bei allen Zellen, bei denen Basis- und Emittorgrid ineinander verschachtelt sind, verläuft die Grenze zwischen n- und p-Bereich über eine lange Strecke an der Oberfläche (gelbe Linie in Fig. 76). Am pn-Übergang ist die Konzentration von n- und p-Ladungsträgern gleich groß, der Einfluß auf die IV-Kennlinie wird im Zwei-Dioden-Modell durch die zweite Diode mit Idealität $n_2 = 2$ und dem Dunkelstrom J_{02} beschrieben [2, 128].

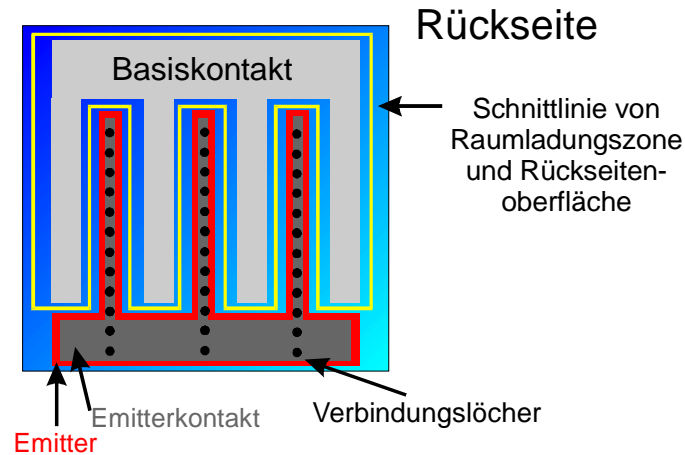


Fig. 76: Schema der beiden ineinander verschichteten Kontaktgrids auf der Zellrückseite. Gelb eingezeichnet ist die Schnittlinie von pn-Übergang und Oberfläche. Diese Schnittlinie ist hier sehr viel länger als bei herkömmlichen Zellen, bei denen sie gleich dem Zellumfang ist [128].

An der Oberfläche ist die Störstellendichte wegen der Symmetriebrechung der Kristallstruktur erhöht. Schädigung der Oberflächenstruktur durch mechanische Bearbeitung (Sägen, Fräsen), durch thermische Belastung (Laser) oder durch Plasmabearbeitung erhöhen die Störstellendichte und führen zu erhöhter Rekombination (Fig. 77). Der Dunkelstrom J_{02} , der bei konventionellen Zellen etwa $5 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ beträgt, erhöht sich je nach ORG im Bereich des an die Oberfläche grenzenden pn-Übergangs auf über $2 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (Fig. 78). Zellen, bei denen über große Flächen p- und n-Bereich aneinandergrenzen, sind davon stärker betroffen als konventionelle Zellen, bei denen sich der kritische Bereich auf den Zellumfang beschränkt.

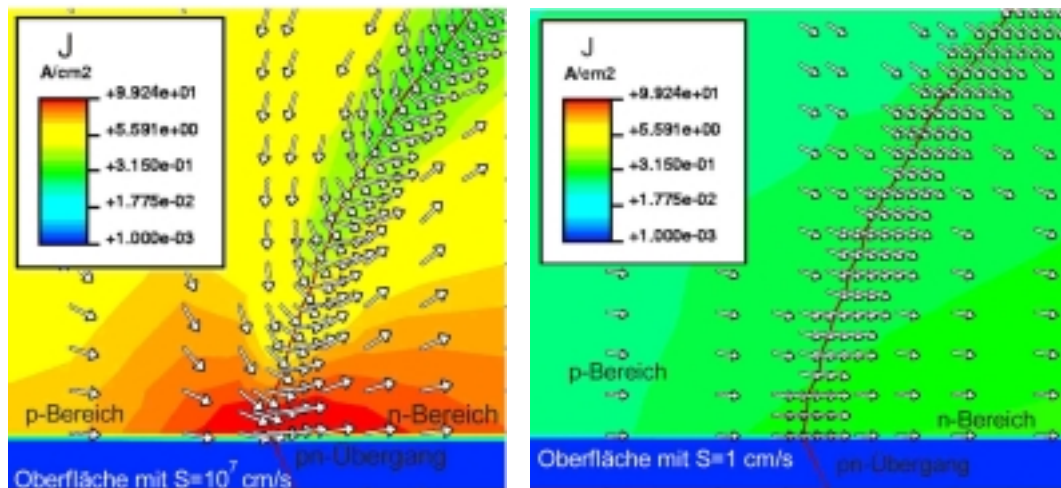


Fig. 77: pn-Übergang an der Oberfläche mit $S_r = 10^7 \text{ cm/s}$ (links) und $S_r = 1 \text{ cm/s}$ (rechts) unter V_{oc} -Bedingungen. Die Simulation (DESSISTM [129]) zeigt den hohen Rekombinationsstrom am Schnittpunkt von Oberfläche und pn-Übergang. Für die Stromdichte ist nur die Farbe kennzeichnend, die Pfeile hingenen geben die Stromrichtung in jedem Gitterpunkt an.

Die DESSISTM Simulation zeigt, daß bei $S_r = 10^7 \text{ cm/s}$ an der Grenze von Oberfläche und pn-Übergang ein hoher Rekombinationsstrom fließt, wohingegen bei $S_r = 1 \text{ cm/s}$ der

Rekombinationsstrom durch den pn-Übergang unabhängig von der Oberfläche überall gleich groß ist.

Simulationsrechnungen mit DESSISTM (Fig. 78) zeigen, daß die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit am pn-Übergang kleiner als 10^4 cm/s sein muß, um eine deutliche Veränderung der Kennlinie (Anstieg von J_{02}) und daraus resultierende Verringerung von V_{oc} zu vermeiden (Fig. 79). Wird eine konventionelle Zelle mit der Wafersäge bearbeitet und nach jedem neu eingefügten Schnitt die Dunkelkennlinie aufgenommen, so ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf wie bei Erhöhung der ORG in der DESSISTM Simulation (Fig. 78, vgl. auch [128]). Bei hoher ORG ($> 10^6$ cm/s) dominiert J_{02} die IV-Kennlinie derart, daß über die Größe von J_{01} keine Aussage mehr möglich ist. Durch die starke Veränderung der Kennlinie wird die Erhöhung von J_{01} aufgrund des zusätzlichen Rückseitenemitters oft überdeckt (vgl. [48, 130]).

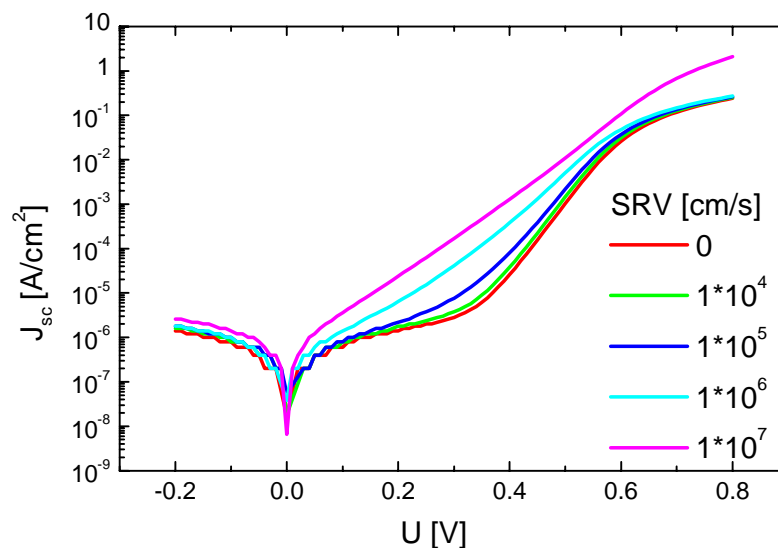


Fig. 78: Simulation (2 dimensional, DESSISTM) der Dunkelkennlinie einer EWT-Zelle mit der ORG am Schnittpunkt von pn-Übergang und Rückseite als Parameter. Ein nahezu identisches Bild ergibt sich, wenn in die Vorderseite mehr und mehr oberflächenschädigende Säge- oder Laserschnitte eingebracht werden [128].

Falls $S_r < 10^4$ cm/s nicht gewährleistet werden kann, wäre es sinnvoll, die Zahl der Finger zu reduzieren, um so den Flächenanteil der rekombinationsträchtigen Bereiche zu verringern (Fig. 79). Dadurch stiege wiederum der Serienwiderstand, so daß durch Schädigung der Oberfläche im pn-Bereich in jedem Fall deutliche Einbußen im Wirkungsgrad in Kauf genommen werden.

Die Verwendung einer Diffusionsbarriere vermeidet die Schädigung der an die Oberfläche grenzenden pn-Region. Durch Absättigung von freien Bindungen durch die Diffusionsbarriere (Siliziumoxid oder geeignetes Siliziumnitrid) könnte die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit möglicherweise sogar reduziert werden. An mit der siebgedruckten Diffusionsbarriere hergestellten EWT-Zellen wurde $J_{02} < 5 \cdot 10^{-8}$ A/cm² gemessen (Tabelle 4-6). Bei EWT-Zellen mit kleinen bis mittleren Diffusionslängen ist V_{oc} dann hauptsächlich durch J_{01} begrenzt.

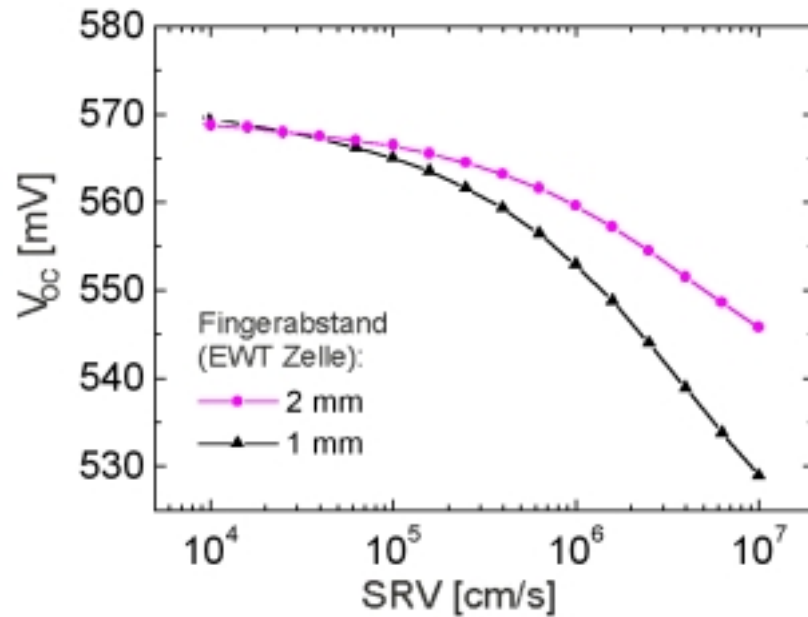


Fig. 79: Simulation (DESSISTM) von V_{oc} in Abhängigkeit der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit (SRV) für zwei Fingerabstände ($\tau = 5 \mu\text{s}$). Bei hoher SRV sollte die Zahl der Finger möglichst klein sein. Ist SRV kleiner als $3 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ (Verwendung von Diffusionsbarrieren) besteht die Abhängigkeit zwischen V_{oc} und der Zahl der Finger nicht mehr.

5.1.4 Zusammenfassung

Der zusätzliche Rückseitenemitter von EWT-Zellen verringert die Leerlaufspannung aufgrund von zwei verschiedenen Effekten: Der erste hängt mit der geringen Diffusionslänge im verwendeten Silizium zusammen und äußert sich in einer Erhöhung von J_{01} . Dieser ist konzeptbedingt und kann nicht vermieden werden. Der zweite Effekt (Erhöhung von J_{02}), wird durch die Schädigung der Oberfläche verursacht und ist prozeßabhängig. Die Vergrößerung von J_{02} kann bei der pn-Bereichsdefinition z. B. durch Verwenden einer Diffusionsbarriere anstatt eines oberflächenschädigenden Verfahrens verhindert werden.

5.2 Parallel- und Serienwiderstand

5.2.1 Kontakt- und Linienwiderstandsbestimmung der Metallisierungspasten

Am meisten limitierend für den Wirkungsgrad der hier untersuchten EWT-Zellen ist der Serienwiderstand. Dieser setzt sich aus mehreren Beiträgen zusammen. Um den Beitrag der beiden Grids abschätzen zu können, wurden an einer fertigen Zelle mittels Vier-Punkt-Messung die Serienwiderstandsbeiträge des Kontaktgrids bestimmt (Tabelle 5-2) [131]. Dabei stellte sich heraus, daß der Serienwiderstandsanteil des Emittergrids doppelt so groß ist wie der Anteil des Basisgrids. Die spezifische Leitfähigkeit der Al/Ag-Paste ist zwar geringer, dafür ist die Fingerdicke jedoch fast dreimal so groß.

Tabelle 5-2: Serienwiderstandsbeiträge des Kontaktgrids [131].

Basisgrid (Paste A, Ag/Al):		
Fingerlänge:	4,5 cm	
Linienwiderstand über 4,1 cm:	157 mΩ →	38 mΩ/cm
Dektakmessung Fingerbreite:	600 μm	
Fingerhöhe:	35 μm	→ Querschnitt 1,5*10 ⁴ μm ²
→ spezifischer Widerstand ρ _{Ag/Al} =	5,7 μΩcm	
Beitrag Busbar	15 mΩ/cm	
Emittergrid (Ag):		
Fingerlänge:	4,5 cm	
Linienwiderstand über 3,8 cm:	290 mΩ →	76 mΩ/cm
Dektakmessung Fingerbreite:	400 μm	
Fingerhöhe:	12 μm	→ Querschnitt 4,4*10 ³ μm ²
→ spezifischer Widerstand ρ _{Ag} =	3,5 μΩcm	
Beitrag Busbar	11 mΩ/cm	

Auf die Busbars werden normalerweise Kupferbänder (Tabbings) mit verschwindet geringem Linienwiderstand (< 1 mΩ/cm) gelötet, so daß der Beitrag Busbar zu vernachlässigen ist.

Tabelle 5-3: Summe der Serienwiderstandsbeiträge des Kontaktgrids (100 cm² Zellfläche)

Basis:	$R_{\text{finger}} = 68 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
	$R_{\text{busbar}} = 156 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
Emitter:	$R_{\text{finger}} = 139 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
	$R_{\text{busbar}} = 229 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
Σ	$R_{\text{grid}} = 0,6 \Omega\text{cm}^2$

Ohne die Beiträge der Busbars (Leitfähigkeit durch Tabbings erhöht) beträgt R_{grid} nur 200 mΩcm² (Tabelle 5-3). Aus den IV-Messungen wurden für R_{serie} Werte von über 0,8 Ωcm² bestimmt (Fig. 55), was auf weitere Serienwiderstandsbeiträge unabhängig vom Grid schließen läßt (Emitterschichtwiderstand etc.). Die Kontaktwiderstände wurden nach der TLM-Methode [132] bestimmt (Tabelle 5-1), ihr Beitrag ist jedoch so klein, daß er gegenüber den anderen Serienwiderstandsbeiträge vernachlässigt werden kann [133, 134].

Tabelle 5-4: Kontaktwiderstände, nach der TLM-Methode bestimmt

Ag	$\rho_{\text{contact}} = 0,3 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$	auf Zellgröße umgerechnet:	$R_{\text{contact}} = 1,8 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$
Ag/Al	$\rho_{\text{contact}} = 5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$	auf Zellgröße umgerechnet:	$R_{\text{contact}} = 30 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$

5.2.2 Weitere Beiträge zum Serienwiderstand

Zum Gesamtserienwiderstand von EWT-Zellen tragen nicht nur die beiden Fingergrids bei. Im Folgenden sind die wichtigsten Einzelbeiträge aufgelistet. Für den Beitrag im Frontemitter (Gleichung 5-1) wurde angenommen, daß die Verbindungslöcher abstandslos aneinandergereiht sind („Schlitze“), so daß dieser Beitrag eine untere Abschätzung darstellt.

Emitterschichtwiderstand, d Fingerabstand,:

$$\text{Gleichung 5-1} \quad R_{emitter} = \rho_{schicht}^{emitter} \cdot \frac{d^2}{6} \quad [2]$$

spezifischer Widerstand der Basis, W Waferdicke:

$$\text{Gleichung 5-2} \quad R_{basis} = \rho_{spez}^{basis} \cdot \frac{d^2}{W * 6} \quad [2]$$

Linienwiderstand in den Fingern, Breite b , Dicke h , und Länge l der Finger:

$$\text{Gleichung 5-3} \quad R_{finger} = \rho_{finger} \cdot \frac{l}{3b \cdot h} \cdot \frac{\text{Zellfläche}}{\text{AnzahlFinger}}$$

Widerstand innerhalb der Verbindungslöcher mit Radius r :

$$\text{Gleichung 5-4} \quad R_{Loch} = \rho_{schicht}^{emitter} \cdot \frac{W}{12\pi \cdot r} \cdot \frac{\text{Zellfläche}}{\text{AnzahlLöcher}}$$

Beitrag durch Basisbusbar mit Breite D :

$$\text{Gleichung 5-5} \quad R_{bb}^{emitter} = \rho_{schicht}^{emitter} \cdot \frac{D^2}{6} \quad [2]$$

Beitrag durch Emitterbusbar:

$$\text{Gleichung 5-6} \quad R_{bb}^{Bulk} = \rho_{spez}^{basis} \cdot \frac{D^2}{W * 6}$$

Kontaktwiderstand mit Transferlänge L_T :

$$\text{Gleichung 5-7} \quad R_c = \frac{\rho_c}{L_T} \cdot \frac{\text{WaferKantenlänge}}{\text{AnzahlFinger}} \quad [2]$$

Außer den drei Beiträgen von Basis, Emitter und Finger (R_{basis} , $R_{emitter}$ und R_{finger}) tragen zu R_{serie} bei: der Kontaktwiderstand von Basis- und Emittergrid $R_c^{emitter}$ bzw. R_c^{basis} , der Widerstand R_{loch} innerhalb der unmetallisierten Verbindungslöcher, der Widerstand bedingt durch die Busbars im Bulk und im Frontemitter R_{bb}^{Bulk} bzw. $R_{bb}^{emitter}$, und der Widerstand innerhalb der Busbars R_{bb} . Durch Auflöten von Kupferstreifen wird R_{bb} vernachlässigbar klein. R_{bb} wird daher hier nicht weiter betrachtet, ebensowenig der Kontaktwiderstand $R_c^{emitter}$ bzw. R_c^{basis} .

Alle Serienwiderstandsbeiträge müssen addiert werden, um den Gesamtserienwiderstand zu erhalten. Allerdings ist der Füllfaktor von EWT-Zellen manchmal niedriger als dem

berechneten (und auch dem bei V_{oc} gefitteten) Serienwiderstand entsprechen würde. Dies läßt sich mit Hilfe des Modells der „verteilten Serienwiderstände“ [96] oder auch über Netzwerksimulationen [54] erklären: Eine Solarzelle kann als Kombination von verschiedenen Unterzellen mit jeweils eigenen Strom-Spannungskennlinien betrachtet werden. Werden die Unterzellen über Serienwiderstände miteinander verbunden, erreicht jede ihren optimalen Arbeitspunkt bei einer anderen Spannung, was zur Verringerung des Füllfaktors um 1 - 4 % (abs.) führt. Daher ist die gute Leitfähigkeit innerhalb der Verbindungslöcher von größerer Bedeutung als aus dem Wert für R_{loch} auf den ersten Blick geschlossen werden kann. Ähnlich verhält es sich mit den Busbarbereichen.

In Tabelle 5-5 sind die Serienwiderstandsbeiträge für einen konkreten Prozeß zusammengestellt. Dabei ist bemerkenswert, daß der berechnete Gesamtserienwiderstand beim Prozeß mit selektivem Emitter mit dem experimentellen Wert übereinstimmt ($1,7 \Omega\text{cm}^2$ direkt nach dem Feuern der Kontakte, $1,3 \Omega\text{cm}^2$ mit Busbartabbing). Beim Prozeß mit homogenem $35 \Omega/\text{sqr}$ Emitter lagen die gemessenen Werte ($> 2 \Omega\text{cm}^2$) deutlich über den berechneten ($1,1 \Omega\text{cm}^2$ mit Tabbing). Die Diskrepanz ist sehr wahrscheinlich auf einen höheren Emitterschichtwiderstand innerhalb der Löcher zurückzuführen (als auf der Waferoberfläche gemessen). Wenn die Busbars mit Kupferstreifen verstärkt werden, sind die zwei größten Beiträge der Frontemitter und der Widerstand in der Basis. Beide könnten durch einen kleineren Fingerabstand verringert werden.

Tabelle 5-5: Beiträge zum Serienwiderstand für eine EWT-Zelle mit Zwei-Stufen-Emitter ($80/7 \Omega/\text{sqr}$) und mit homogenem Emitter ($35 \Omega/\text{sqr}$) auf $1,0 \Omega\text{cm}$ Cz-Silizium. Fingerabstand $2,4 \text{ mm}$, Fingerbreite $400 \mu\text{m}$, Durchmesser eines Verbindungsloches $100 \mu\text{m}$, Lochabstand $800 \mu\text{m}$. Alle Serienwiderstände sind in Ωcm^2 angegeben, Zellfläche 100 cm^2 .

	R_{finger}	R_{loch}	$R_{emitter}$	R_{basis}	R_c	R_{bb}	R_{gesamt}
homogener Emitter	0,2	0,15	0,34	0,32	0,03	0,39	1,4
selektiver Emitter	0,2	0,03	0,77	0,32	0,03	0,39	1,7

5.2.3 Shuntwiderstand

Die Wahrscheinlichkeit von lokalen Kurzschlüssen (Shunts) ist bei EWT-Zellen durch die unmittelbar benachbarten p- und n-Bereiche auf der Rückseite erhöht. Bei konventionellen Zellen treten Kurzschlüsse einerseits am Zellrand auf, wenn z. B. der parasitäre pn-Übergang unzureichend getrennt wird. Außerdem entstehen Kurzschlüsse, wenn die Frontmetallisierung den Emitter durchdringt und einen elektrischen Kontakt zur Basis bildet. Bei EWT-Zellen können noch zusätzlich Kurzschlüsse entstehen, wenn p- und n-Bereich auf der Rückseite nicht ausreichend getrennt wurden oder während der Metallisierung wieder verbunden werden.

Die Thermographie und LBIC Bilder von EWT-Zellen zeigen lokal begrenzte Shuntbereiche, die jedoch nicht mit dem Gridgeometrie in Zusammenhang zu stehen scheinen. Oft – jedoch nicht immer – treten die Shunts am Zellrand, speziell in den Ecken auf (Fig. 80). Wie die

LBIC Messung in Fig. 83 zeigt, entsteht an einer Ecke jedoch nicht zwangsläufig ein Kurzschluß. Als Erklärung für das häufige Auftreten von Shunts an den Waferkanten wäre eine Beschädigung des Zellrandes während dem Prozeß denkbar – da die Zellränder beim EWT Prozeß nicht abgetrennt werden, besteht dort ein erhöhtes Risiko zu Kurzschlüssen (vgl. auch Fig. 65 links). Konventionelle Zellen, deren parasitärer pn-Übergang nicht auf der Zellvorderseite sondern auf der Rückseite durchtrennt wird, weisen ebenfalls eine höhere Streuung des Shuntwiderstandes auf - möglicherweise aus demselben Grund [70, 83].

Da Emitter- und Basiskontakt auf die gleiche Seite der Zelle gedruckt werden, kann auch verschmierte oder beim Absprung des Siebes verspritzte Paste zu Kurzschlüssen führen. Ungenügende Maskierungen oder Löcher in der Diffusionsbarriere können ebenfalls Shunts verursachen. Die erreichten Shuntwerte von über $1500 \Omega\text{cm}^2$ zeigen jedoch, daß Kurzschlüsse bei geeigneter Prozeßführung durchaus vermieden werden können.

Den Messungen in Fig. 80 - Fig. 82 läßt sich entnehmen, daß Rekombination und Shunts unabhängig von der Kontaktanordnung sind. Für den Fall, daß innerhalb der Verbindungslöcher „Current-Crowding“ [135] auftritt, müßten diese wegen der dadurch entstehenden Erwärmung im Thermographiebild sichtbar sein. Aus den Thermographiebildern kann folglich auch auf genügend hohe Leitfähigkeit innerhalb der Verbindungslöcher geschlossen werden. Durch die Verbesserung der Prozeßbedingungen (speziell beim Siebdruck), verringerte sich die Zahl der Shunts beträchtlich (Fig. 82, Vorderseite durch SiN-Schicht und selbstklebende Folie vor Verunreinigung und Beschädigung geschützt, automatisches optisches Justiersystem).

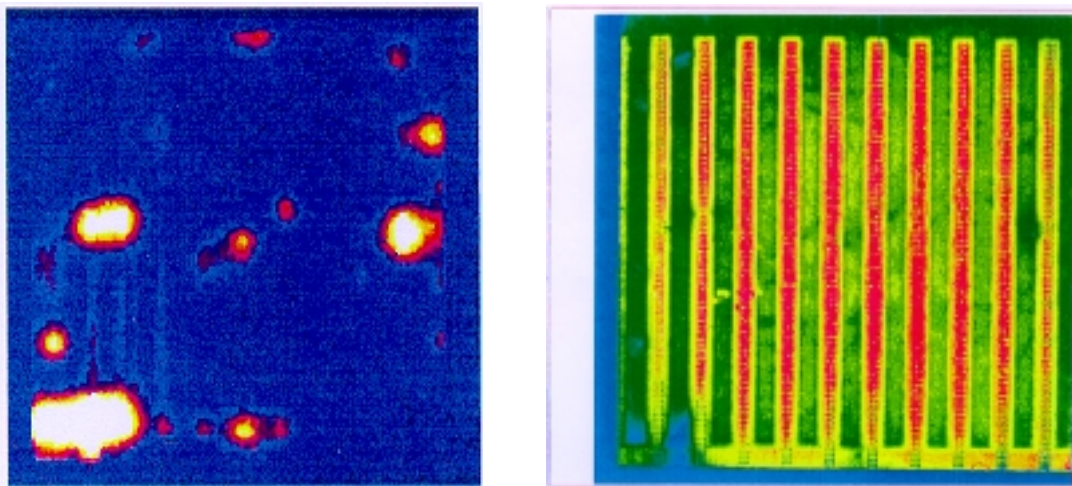


Fig. 80: Lock-In Thermographiebild (Sperrichtung) links im Vergleich mit LBIC Aufnahme rechts [136, 137]. Die hellen Bereiche im linken Bild sind wärmer als die blauen und deuten auf lokale Kurzschlüsse hin. Die Verteilung der Kurzschlüsse ist offenbar unabhängig vom verschachtelten Rückseitengrid, wie man im Vergleich mit dem rechten Bild sieht. Ob die Shunts auf der Zellvorder- oder Rückseite liegen, läßt sich den Bildern nicht entnehmen.

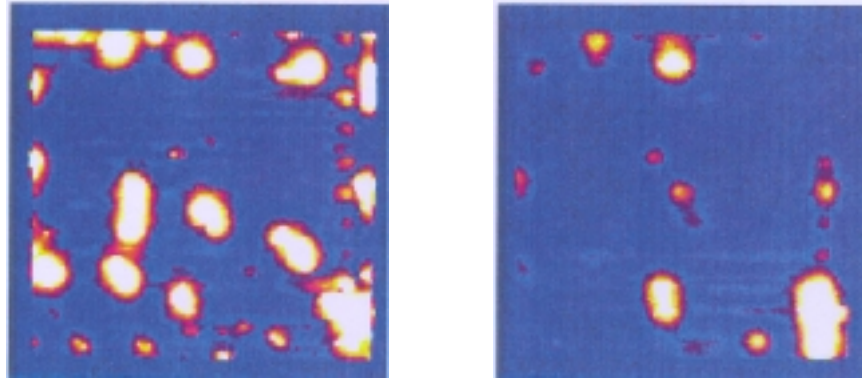


Fig. 81: Lock-In Thermographiebild einer EWT-Zelle unter Vorwärtsspannung (links) und unter Rückwärtsspannung [136]. Die Shunts zeigen kein ohmsches Verhalten, ihr negativer Einfluß ist am optimalen Arbeitspunkt (FF) und bei V_{oc} größer als aus der Dunkelkennlinie bei $U \approx 0$ V geschlossen würde.

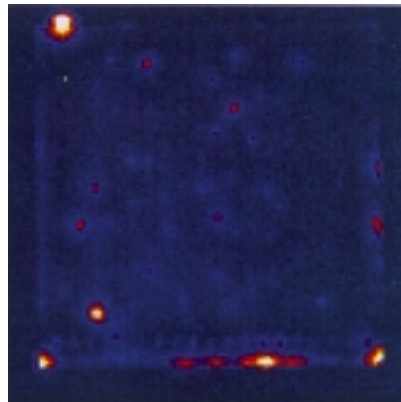


Fig. 82: Thermographiebild [136] einer EWT-Zelle nach Verbesserung der Prozeßbedingungen, insbesondere beim Siebdruck (Durchlaßrichtung, gleiche Skalierung wie bei Fig. 80 und Fig. 81). Es sind kaum noch lokale Shunts zu erkennen. Der aus der IV-Messung bestimmte Shunt betrug $1200 \Omega\text{cm}^2$.

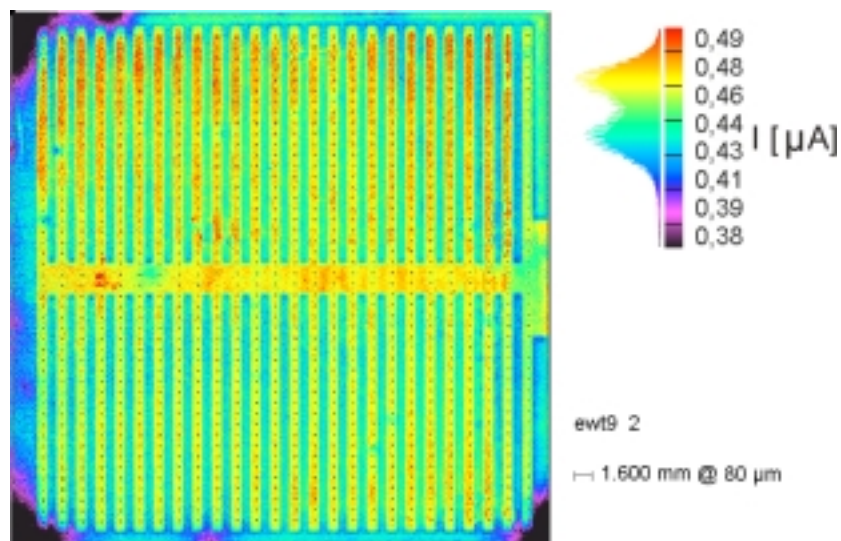


Fig. 83: LBIC Messung einer EWT-Zelle unter Frontbeleuchtung. In drei Ecken ist die Ladungsträger-einsammlung durch Kurzschlüsse reduziert, $\lambda_{\text{Laser}} = 905$ nm.

Die Shunts zeigen in der Regel kein rein ohmsches Verhalten. Der Wert von R_{shunt} bei Messung in Vorwärtsrichtung ist meistens kleiner als in Rückwärtsrichtung – wie sich auch in Fig. 81 aufgrund der größeren Anzahl wärmerer Gebiete bei Anlegen einer Vorwärtsspannung zeigt. Am optimalen Arbeitspunkt (FF) und bei V_{oc} beeinträchtigen diese Shunts den Wirkungsgrad daher mehr, als aus ihrem Wert bei $U \approx 0$ V oder bei Gegenspannung vermutet würde.

5.2.4 Auswirkungen auf den Füllfaktor

Die nur indirekt meßbaren Zellparameter (Fit) J_{02} , Serien- und Parallelwiderstand wirken sich bei der Hellmessung der Zellen hauptsächlich auf den Füllfaktor aus.

Der Füllfaktor aller untersuchten EWT-Zellen wurde durch den Serienwiderstand von über $1,3 \Omega\text{cm}^2$ deutlich verringert. Mit $R_{serie} = 1,3 \Omega\text{cm}^2$ und $J_{02} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ kann nach dem Zwei-Dioden-Modell höchstens ein Füllfaktor von 73 % erreicht werden, wobei der Einfluß der verteilten Serienwiderstände noch nicht berücksichtigt wurde [96]. Je nach Prozeß wurden Shuntwiderstände zwischen einigen hundert und über $1000 \Omega\text{cm}^2$ gemessen. Falls $R_{shunt} > 1000 \Omega\text{cm}^2$, verringert sich der Füllfaktor aufgrund von R_{shunt} (verglichen mit $10^5 \Omega\text{cm}^2$) nur um weniger als 0,2 % abs., die Beeinträchtigung durch den Parallelwiderstand ist also bei geeignetem Prozeß zu vernachlässigen.

5.3 Vergleich mit konventionellen Solarzellen

Mit den erreichten 16 % Wirkungsgrad wurde gezeigt, daß EWT-Zellen tatsächlich in der Lage sind, das gleiche Wirkungsgradniveau wie herkömmliche siebgedruckte Solarzellen zu erreichen. Der Wirkungsgradgewinn von EWT-Zellen durch höheren Kurzschlußstrom wird durch die offenbar bauartbedingte geringere offene Klemmenspannung und den zum Teil ebenfalls bauartbedingten kleineren Füllfaktor zwar geschmälert, aber nicht aufgehoben.

5.3.1 Stromgewinn durch das EWT-Konzept

Durch den rückseitigen Emitter können bei einer EWT-Zelle auch Ladungsträger eingesammelt werden, die bei einer konventionellen Zelle aufgrund von Bulkrekombination nicht zum Kurzschlußstrom beitragen würden. Der Kurzschlußstrom einer Solarzelle mit rückseitigem Emitter (100 % Flächenanteil) ist daher rund 1 mA/cm^2 höher als der einer Zelle ohne rückseitigen Emitter solange gilt $L < 2 \cdot W$ ($S_r = 10^7 \text{ cm/s}$). Da der Rückseitenemitter bei den hier untersuchten Zellen nur die Hälfte der Zellfläche bedeckt, beträgt der zu erwartende Stromgewinn nur $0,5 \text{ mA/cm}^2$. Mittels LBIC Messung bestimmt man den IQE-Unterschied zwischen Bereichen mit und ohne rückseitigen Emitter bei 900 nm zu etwa 10 % (Fig. 58). Zu kürzeren Wellenlängen wird der Unterschied schnell kleiner. Zwischen 900 nm und 1200 nm bestimmt sich die Stromerhöhung aufgrund des Rückseitenemitters aus der LBIC Messung daher zu etwa $0,3 \text{ mA/cm}^2$.

Ist die Bulkdiffusionslänge größer als die halbe Zelldicke läßt sich durch ein ganzflächiges BSF ein höherer Stromgewinn als durch einen rückseitigen Emitter erzielen (Fig. 84).

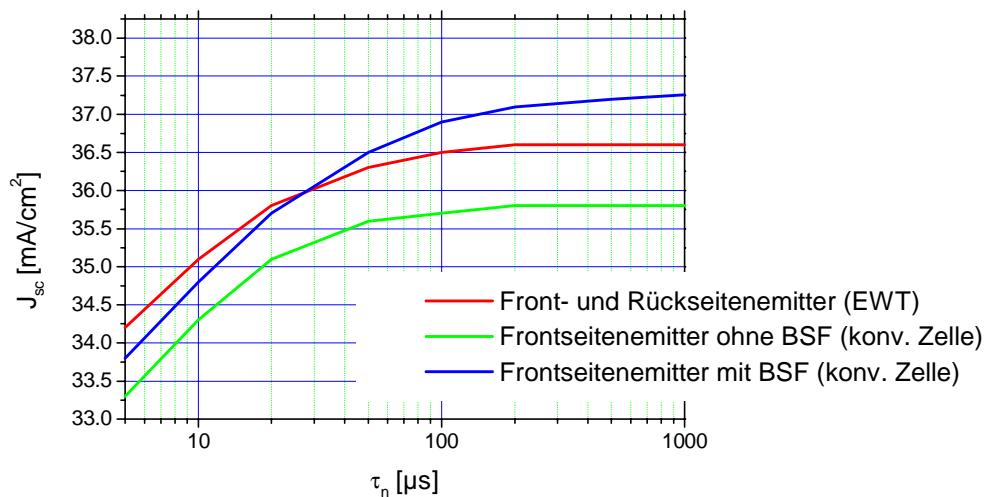


Fig. 84: Erhöhung des Kurzschlußstromes durch einen rückseitigen Emmitter in Abhängigkeit von der Bulklebensdauer (Simulation mit PC1D, $S_r = 10^7$ cm/s). Ist die Bulkdifusionslänge größer als die halbe Zeldicke, kann mittels BSF ein größerer Gewinn in J_{sc} erzielt werden als durch einen rückseitigen Emmitter (gleiche Emmitter auf Front- und Rückseite, $35 \Omega/\text{sqr}$).

Der Stromzuwachs durch Hinzufügen eines Rückseitenemitters ist für $\tau < 40 \mu\text{s}$ nahezu unabhängig von der Bulklebensdauer (Fig. 85). Größer als die Stromerhöhung durch den rückseitigen Emmitter ist der Gewinn durch verringerte Abschattungsverluste. Das Frontgrid verhindert den Lichteintritt bei herkömmlichen Solarzellen auf 7 - 10 % der Zellfläche (je nach Qualität des Fingerdrucks, 40 Finger à $100 \mu\text{m}$ Breite und 2 Busbars à $1,5 \text{ mm}$ Breite). Bei EWT-Zellen gehen nur 0,2 % der Fläche für die Stromeinsammlung verloren (4800 Verbindungslöcher à $80 \mu\text{m}$ Durchmesser). Bei J_{sc} von $32 \text{ mA}/\text{cm}^2$ einer konventionellen Zelle bedeutet dies 2,2 - $3,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ mehr Kurzschlußstrom für die EWT-Zelle.

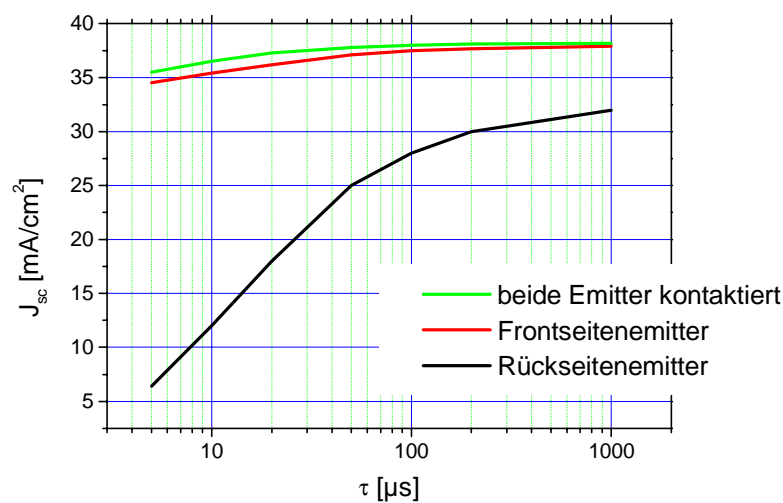


Fig. 85: Stromgeneration in Front- und Rückseitenemitter (Simulation PC1D, $S_r = 5 \cdot 10^3$ cm/s, $80 \Omega/\text{sqr}$). Mit steigender Bulklebensdauer wird mehr und mehr Strom im rückseitigen Emmitter generiert. Der Kurzschlußstrom aus beiden Emitttern übertrifft den des Frontemitters alleine um etwa $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Mittels eines Zwei-Stufen-Emitters, der für EWT-Zellen deutlich einfacher als für herkömmliche Zellen zu realisieren ist, kann der Kurzschlußstrom noch weiter gesteigert werden. Durch verringerte Rekombination und bessere Quantenausbeute im kurzwelligen Spektralbereich ist der Kurzschlußstrom eines $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Frontemitters laut Simulationsrechnung bis zu $1,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ größer als der eines $30 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Emitters (vgl. Fig. 90). Beim Vergleich von EWT-Zellen mit $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Frontemitter und mit $35 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Frontemitter war der Stromgewinn sogar noch etwas größer (Tabelle 4-9). Gegenüber einem $50 \text{ } \Omega/\text{sqr}$ Emitter (der mit Siebdrucktechnik zur Zeit gerade noch kontaktierbar ist) beträgt der Gewinn noch $0,4 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (Simulation).

5.3.2 Verringerte offene Klemmenspannung

Die offene Klemmenspannung der untersuchten EWT-Zellen war in der Regel um 15 - 25 mV kleiner, als die der konventionellen Zellen mit Al-BSF, die aus demselben Material hergestellt wurden. Um den Einfluß der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit mit der Bulklebensdauer als Parameter abzuschätzen, wurde eine vereinfachte EWT-Zelle mit DESSISTM simuliert. Tatsächlich zeigt sich für $\tau = 10 \text{ } \mu\text{s}$ ein Unterschied in V_{oc} von etwa 11 mV zwischen konventioneller Zelle und EWT-Zelle selbst wenn $S_r = 1 \text{ cm}/\text{s}$ beträgt. Mit steigender Bulklebensdauer verringert sich der V_{oc} -Unterschied und ist bei $\tau = 200 \text{ } \mu\text{s}$ nicht mehr erkennbar. Bis $S_r = 10^4 \text{ cm}/\text{s}$ ist V_{oc} unabhängig von der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit (für $\tau < 50 \text{ } \mu\text{s}$), ab $S_r = 10^4 \text{ cm}/\text{s}$ beginnt V_{oc} der EWT-Zelle abzufallen (

Fig. 86). Dieser Abfall verläuft parallel mit dem starken Anstieg von J_{02} , der auch etwa bei $S_r = 10^4 \text{ cm}/\text{s}$ einsetzt (Fig. 78). Für $\tau > 50 \text{ } \mu\text{s}$ verringert sich V_{oc} bei beiden Zellen schon ab $S_r = 10^2 \text{ cm}/\text{s}$. V_{oc} der konventionellen Zelle stabilisiert sich dann jedoch trotz steigender S_r , während V_{oc} der EWT-Zelle weiter abfällt.

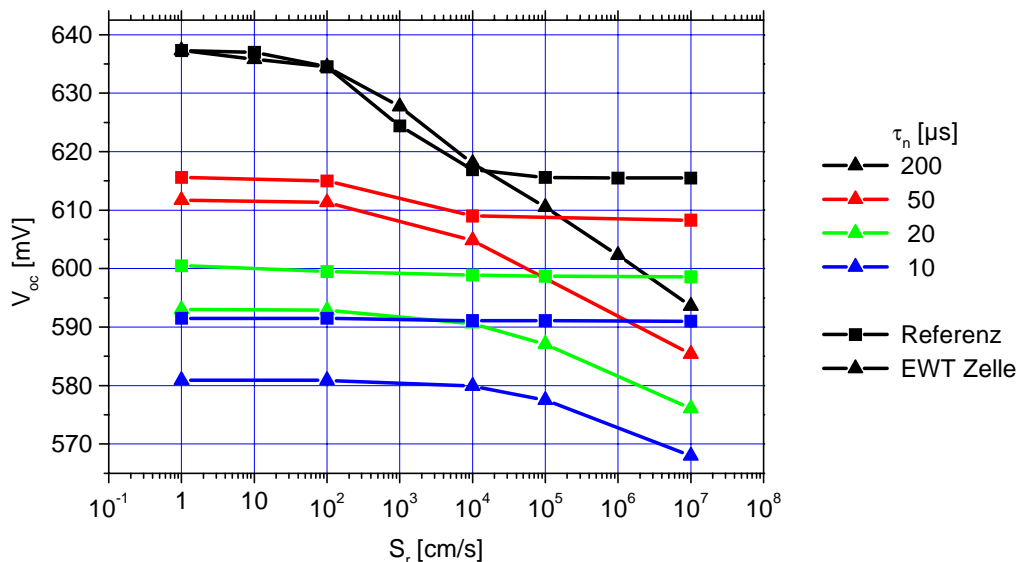


Fig. 86: Simulation (DESSISTM) von V_{oc} in Abhängigkeit der Rückseitenrekombination mit der Bulklebensdauer als Parameter (Identische Emittter bei EWT und Referenz, $80 \text{ } \Omega/\text{sqr}$). Je geringer τ_n , desto stärker beeinträchtigt der Rückseitenemitter der EWT-Zelle die offene Klemmenspannung. Während V_{oc} der Referenz mit steigendem S_r einen Sättigungswert erreicht, sinkt V_{oc} der EWT-Zelle stetig. Für $S_r > 10^4 \text{ cm}/\text{s}$ sinkt V_{oc} der EWT-Zelle (Rekombination am pn-Übergang).

Auch in dieser Simulation bestätigt sich, daß V_{oc} von EWT-Zellen – aufgrund des rückseitigen Emitters in Verbindung mit kleiner Bulklebensdauer – geringer ist als von konventionellen Zellen. Auch zeigt sich hier, daß bei Verwendung von Silizium mit $\tau < 20 \mu\text{s}$ die Leerlaufspannung mittels Oberflächenpassivierung auch bei EWT-Zellen nur wenig gesteigert werden kann.

5.3.3 Wirkungsgrad im Vergleich

Letztendlich zählt bei Solarzellen der Wirkungsgrad. Nachdem in den vorigen Abschnitten einzelne Zellparameter verglichen wurden, soll hier der Wirkungsgrad von EWT und herkömmlichen Zellen mithilfe von DESSISTM-Simulationen untersucht werden.

Wie die Simulationen in Fig. 87 zeigen, ist der Wirkungsgradgewinn einer EWT-Zelle gegenüber einer herkömmlichen Zelle (mit ganzflächigem BSF) am größten, wenn die Basisdiffusionslänge gerade der Zelldicke entspricht. Je nach Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit und Emitterschichtwiderstand der konventionellen Zelle verschiebt sich dieses Optimum hin zu einer Basisdiffusionslänge, die der halben Waferdicke entspricht. Bei $L < \frac{1}{2} W$ verschwindet der positive Einfluß eines BSF, so daß der Vorteil des Rückseitenemitters bei der EWT-Zelle voll zum Tragen kommt. In dieser Simulation ist der Füllfaktor der EWT-Zellen größer als bisher experimentell realisiert, da eine Einheitszelle ohne Busbars simuliert wurde. Bei der konventionellen Zelle fehlt aus dem gleichen Grund die Abschattung durch die Busbars. Bevor der Füllfaktor von EWT-Zellen nicht deutlich gesteigert werden kann, ist der tatsächliche Wirkungsgradvorsprung geringer. Auch nicht berücksichtigt sind hier lebensdauererhöhende Prozeßschritte (Al-Gettern), die sich eher auf konventionelle Zellen anwenden lassen (ganzflächige Al-Metallisierung).

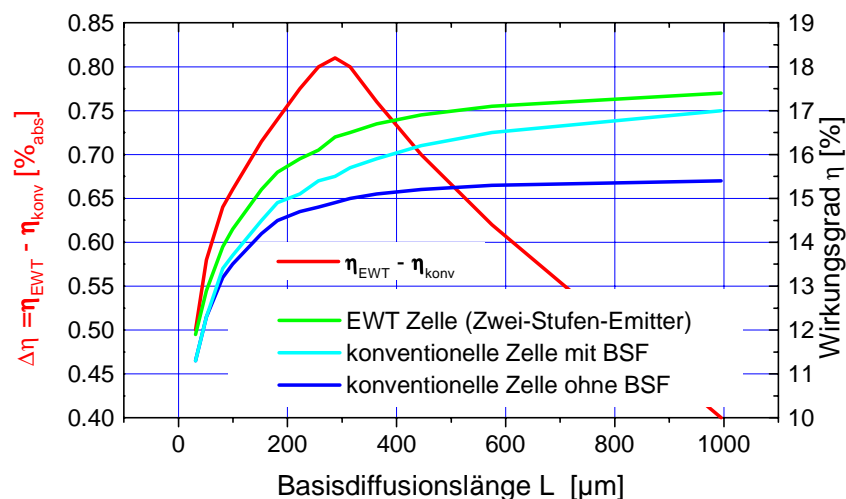


Fig. 87: Wirkungsgradgewinn einer EWT-Zelle (Zwei-Stufen-Emitter) gegenüber einer herkömmlichen Zelle mit BSF und $35 \Omega/\text{sq}$ Emitter (DESSISTM Simulation). Der rückseitige Emitter wirkt sich hier am vorteilhaftesten aus, wenn die Basisdiffusionslänge gerade der Waferdicke entspricht.

Die Simulation in Fig. 88 zeigt, daß die Wirkungsgrade von EWT und konventioneller Zelle je nach Emitterschichtwiderstand und BSF recht nahe beieinanderliegen, so daß sich aufgrund des Wirkungsgrades kein eindeutiger Vorteil für das eine oder das andere Zellkonzept ergibt. In der Simulation wurden unterschiedliche Emitterschichtwiderstände und verschiedene

Rückseiten-Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten angenommen – mit $50 \Omega/\text{sqr}$ Emitter und gutem BSF ist der Wirkungsgrad konventioneller Zellen dem von EWT-Zellen mit passivierter Rückseite vergleichbar.

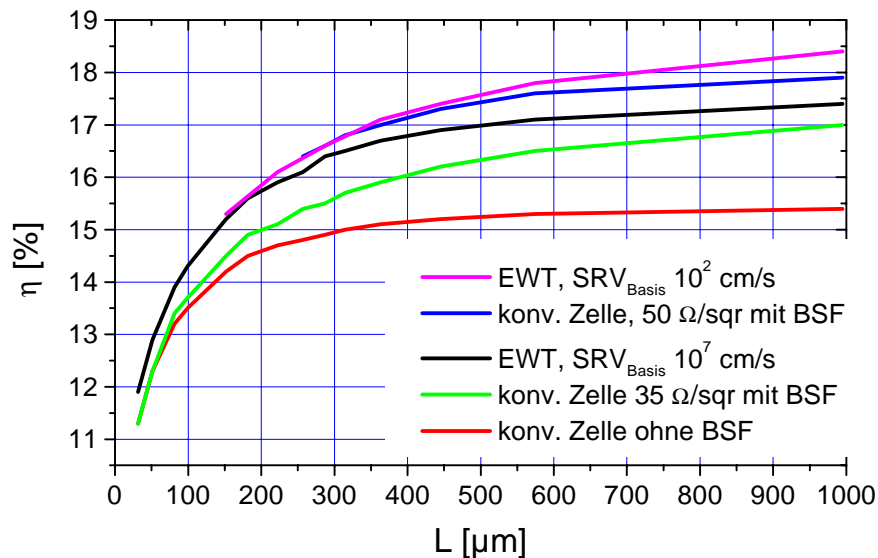


Fig. 88: Simulation des Wirkungsgrades von EWT und herkömmlichen Zellen mit verschiedenen Parametern für BSF und Emitterschichtwiderstand bzw. Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit. Je nach Passivierung der Rückseite und des Frontemitterschichtwiderstands ist der Wirkungsgrad der EWT oder der konventionellen Zelle größer.

5.4 Optimierung von EWT-Zellen

5.4.1 Vorbemerkung

Die vorigen Abschnitte dienten dazu, die Funktionsweise von EWT-Zellen zu verstehen und die in Kapitel 4 beschriebenen Meßwerte zu erklären. Im folgenden Abschnitt sollen die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um den Herstellungsprozeß zu verbessern und den erzielbaren Wirkungsgrad zu erhöhen. Dabei spielt vor allem die Wahl der Gridgeometrie eine große Rolle, die jedoch wiederum an Emitterschichtwiderstand und Basisdotierung gekoppelt ist. Teilweise wurde auf Computersimulationen zurückgegriffen, wegen des enormen Rechenaufwandes für eine dreidimensionale EWT Einheitszelle wurden jedoch nur zweidimensionale Ausschnitte simuliert. Für die industrielle Anwendung muß in der Regel ein Kompromiß zwischen Wirkungsgrad und Prozeßkosten/Durchsatz eingegangen werden, was bei der Optimierung mitberücksichtigt wurde. In Fig. 89 ist schematisch dargestellt wie Prozeß- und Geometrieparameter die Zellparameter (Wirkungsgrad, Prozeßkosten und Durchsatz) beeinflussen.

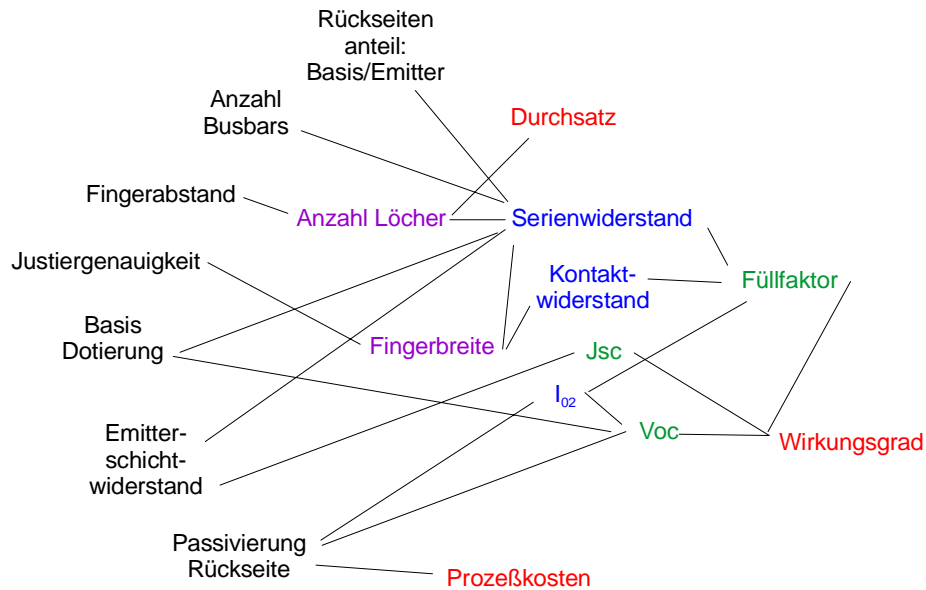


Fig. 89: Frei wählbare Parameter für EWT-Zellen (schwarz), ihr unmittelbarer Einfluß auf das Zelldesign (violett) und die indirekte Wirkung auf Kurzschlußstrom, Füllfaktor und Leerlaufspannung (blau), die alle drei letztendlich den Wirkungsgrad bestimmen. Für die industrielle Fertigung müssen Prozeßkosten und Durchsatz zum Wirkungsgrad passen und deshalb bei der Prozeßoptimierung ebenfalls betrachtet werden.

5.4.2 Emitterschichtwiderstand

Aus der Simulation (DESSISTM) ergibt sich ein Optimum für den Emitterschichtwiderstand bei 80 - 100 Ω/sqr (Fig. 90). Bei höherem Schichtwiderstand steigt der Kurzschlußstrom zwar noch leicht an, jedoch verringert der ebenfalls ansteigende Serienwiderstandsanteil im Frontemitter den Füllfaktor, so daß sich ein Wirkungsgradoptimum bei etwa 80 Ω/sqr einstellt. Bei Berücksichtigung der Bereiche über den Basisbusbars und dem mit ARC höheren Strom liegt der optimale Wert eher noch leicht darunter.

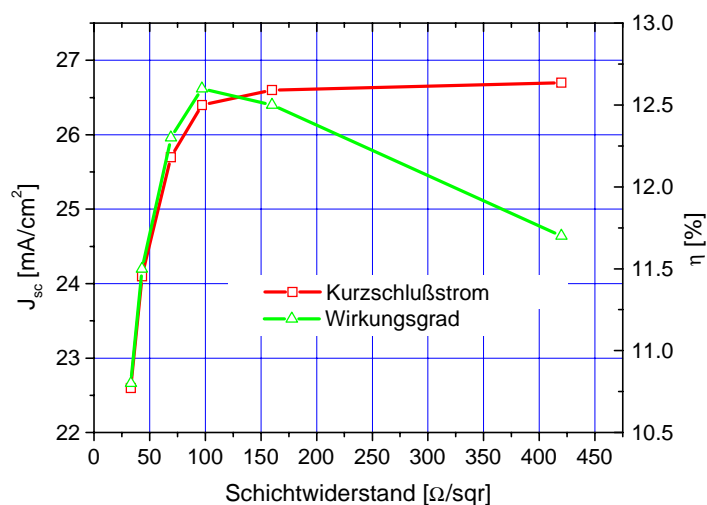


Fig. 90: Kurzschlußstrom und Wirkungsgrad von EWT-Zellen in der Computersimulation mit DESSISTM (ohne ARC). Mit steigendem Schichtwiderstand steigt auch der Kurzschlußstrom bis zu einem Sättigungswert bei 150 Ω/sqr . Ab etwa 100 Ω/sqr reduziert der erhöhte Serienwiderstand im Frontemitter den Füllfaktor, so daß das Wirkungsgradoptimum zwischen 80 und 100 Ω/sqr liegt (Fingerabstand 2,4 mm).

5.4.3 Optimaler Fingerabstand

Größere Fingerabstände erhöhen den Serienwiderstandsanteil des Frontemitters und der Basis, verringern die Länge des pn-Übergangs an der Oberfläche und erleichtern das Alignment. Außerdem verringern sie die Zahl der Löcher, die gebohrt werden müssen. Ist die Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit größer als $3 \cdot 10^4$ cm/s ist, kann durch Erhöhen des Fingerabstandes J_{02} verringert werden; für $S_r < 3 \cdot 10^4$ cm/s ist J_{02} unabhängig vom Fingerabstand (Fig. 79). Der optimale Fingerabstand ergibt sich dann alleine aus dem Serienwiderstandsbeitrag R , der sich hauptsächlich aus folgenden drei Komponenten zusammensetzt (Kapitel 5.2.2):

$$\text{Gleichung 5-8} \quad R = R_{\text{basis}} + R_{\text{emitter}} + R_{\text{finger}}$$

Sehr kleine Fingerabstände erfordern schmale Finger mit entsprechend hohem Fingerwiderstand. Große Fingerabstände erlauben breite Finger, der Serienwiderstand im Frontemitter und in der Basis steigt dann jedoch an. Je geringer der Fingerabstand, desto größer wird der Flächenanteil, der für die Justierung benötigt wird. In Fig. 91 sieht man, daß der Fingerabstand bei 600 μm Justierspiel (siehe Fig. 97) nicht größer als 2 mm sein sollte, da sonst der Gesamtserienwiderstand über $1 \Omega\text{cm}^2$ ansteigt. Bei 600 μm Justierspiel beträgt der minimale Gesamtserienwiderstand $0,9 \Omega\text{cm}^2$ (beim optimalen Fingerabstand von 1,6 mm). Bei 800 μm Justierspiel kann der Gesamtserienwiderstand nicht kleiner als $1,3 \Omega\text{cm}^2$ werden.

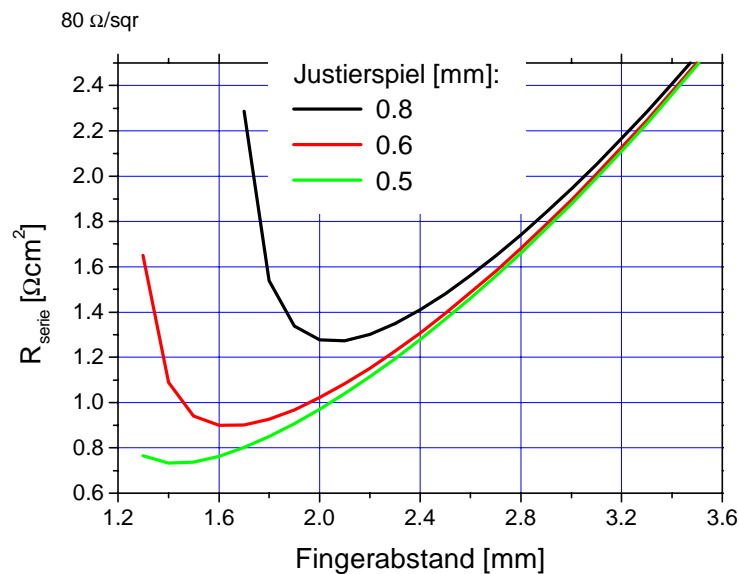


Fig. 91: Serienwiderstandsbeitrag R (Gleichung 5-8) in Abhängigkeit vom Fingerabstand mit Justierspiel als Parameter. Justierspiel ist der für sicheres Alignment nötige Abstand zwischen benachbarten Fingern. Der Frontemitterschichtwiderstand beträgt hier $80 \Omega/\text{sqr}$ und $\rho_{\text{Basis}} = 1 \Omega\text{cm}$.

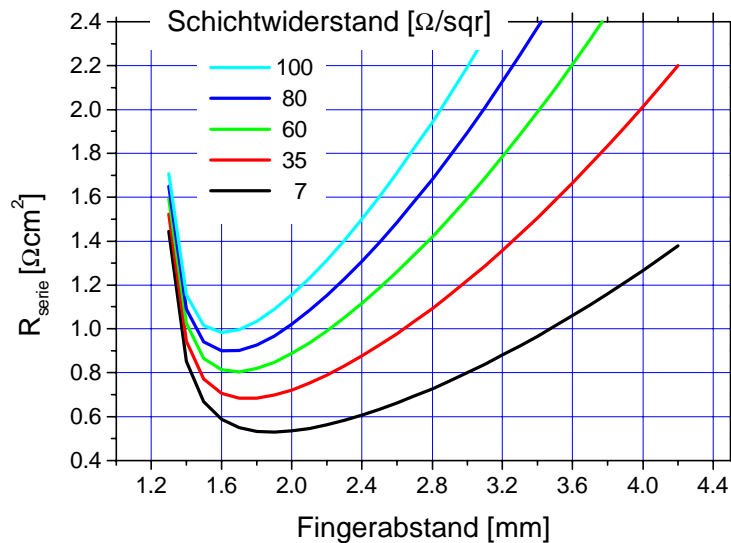


Fig. 92: Serienwiderstand R_{serie} für verschiedene Frontemitterschichtwiderstände (Rückseitenemitter und Verbindungslochemitter $7 \Omega/\text{sqr}$). Justierspiel ist hier $0,6 \text{ mm}$, Basisdotierung $1 \Omega\text{cm}$. Zur Bewertung von R_{serie} : Steigt R_{serie} von $1,0$ auf $1,3 \Omega\text{cm}^2$ (entspricht Fingerabstand $2,0$ auf $2,4 \text{ mm}$ bei $80 \Omega/\text{sqr}$) sinkt der Zellwirkungsgrad um $0,3 \%$ (abs.), steigt R_{serie} von $1,0$ auf $1,6 \Omega\text{cm}^2$ reduziert sich η sogar um $0,7 \%$ (abs.).

Der Frontemitterschichtwiderstand hat großen Einfluß auf R_{serie} (Fig. 92). Je höher der Schichtwiderstand, desto steiler steigt der Serienwiderstand mit wachsendem Fingerabstand und desto größer ist auch der Gesamtserienwiderstand bei optimalem Fingerabstand. Bei $60 \Omega/\text{sqr}$ Frontemitterschichtwiderstand beträgt der minimale Serienwiderstand $0,8 \Omega\text{cm}^2$ ($1,6 \text{ mm}$ Fingerabstand), bei $80 \Omega/\text{sqr}$ sind es schon $1,1 \Omega\text{cm}^2$. Je höher der Frontemitterschichtwiderstand, desto kleiner wird auch der optimale Fingerabstand – und desto mehr Verbindungslöcher müssen gebohrt werden.

5.4.4 Basisdotierung

Für Solarzellen wird gewöhnlich Silizium mit einer p-leitenden Grunddotierung (Bor) von $1,6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho = 1 \Omega\text{cm}$) verwendet. Diese Dotierung ist ein Kompromiß zwischen niedrigem Dunkelstrom und damit hoher Spannung bei hoher Dotierung und sinkender Minoritätsladungsträgerlebensdauer bei niedriger Dotierung [138]. Bei konventionelle Zellen mit ganzflächigem Rückkontakt ist der Serienwiderstandsbeitrag in der Basis vernachlässigbar klein, nicht jedoch bei Zellen mit verschachteltem Fingergrid (EWT-Zellen). Bei EWT-Zellen ist der Anteil des Serienwiderstandes in der Basis etwa halb bis gleich groß wie der Anteil des Frontemitters (Gleichung 5-8 und Gleichung 5-2). Nach Gleichung A-5 entspricht ein spezifischer Widerstand von $1 \Omega\text{cm}$ einem Schichtwiderstand von $33 \Omega/\text{sqr}$ (Waferdicke $W = 300 \mu\text{m}$).

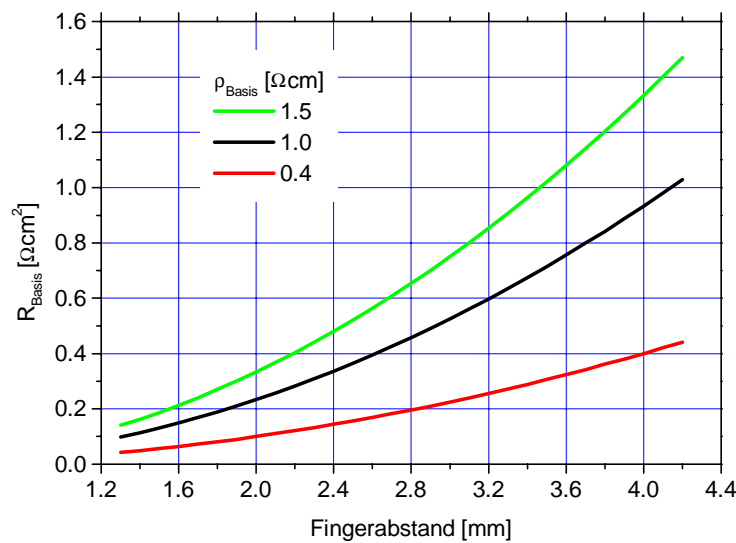


Fig. 93: Anteil der Basis am Serienwiderstand nach Gleichung 5-2 für verschiedene Basisdotierungen.

Bei 2,4 mm Fingerabstand reduziert sich der Serienwiderstand um $0,2 \Omega\text{cm}^2$ falls die Bor-Dotierung $4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ statt nur $1,6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ beträgt. Neben der Erhöhung von V_{oc} (PC1D 645 mV statt 619 mV) ist für hochdotiertes Silizium ($0,4 \Omega\text{cm}$) deshalb auch eine Füllfaktorverbesserung ($> 1 \%$ rel.) zu erwarten – bei nahezu unverändertem Strom ($< 1 \%$ rel.). Insgesamt ist durch eine höhere Basisdotierung folglich auch ein höherer Wirkungsgrad zu erwarten. Experimentell konnten diese Erwartungen nicht bestätigt werden, es wurde weder eine höhere Leerlaufspannung, noch ein höherer Füllfaktor bei EWT-Zellen aus multikristallinem Silizium mit $0,4 \Omega\text{cm}$ spezifischer Leitfähigkeit gemessen. Cz-Silizium höherer Dotierung ist schwer erhältlich, die beste EWT-Zelle aus $0,4 \Omega\text{cm}$ Cz-Silizium wies zwar keine höhere Spannung (599 mV) aber doch einen etwas höheren Füllfaktor auf (72 %). Der Serienwiderstand dieser Zelle wurde zu $1,1 \Omega\text{cm}^2$ bestimmt, was mit den Berechnungen recht gut übereinstimmt.

5.4.5 Passivierung der Basisoberfläche

Die IQE einer konventionellen Zelle mit BSF fällt im langwelligen Spektralbereich steiler ab als die IQE einer EWT-Zelle. Dies kann auf eine geringere ORG der konventionellen Zelle aufgrund des ganzflächigen BSF ($S_r \approx 800 \text{ cm/s}$ [19]) zurückzuführen sein, oder auch auf eine größere Volumenlebensdauer in der konventionellen Zelle aufgrund von Al-Gettereffekten [118, 139]. Der steilere Abfall bedeutet einerseits eine höhere Leerlaufspannung [101, 103] und andererseits auch einen Gewinn im Kurzschlußstrom (Gleichung 3-6). Eine verbesserte Oberflächenpassivierung für EWT-Zellen sollte daher untersucht werden. Dabei ist aufgrund der Fingerstruktur der Rückseitenmetallisierung von EWT-Zellen sogar eine Steigerung gegenüber der konventionellen Zelle denkbar („lokales BSF“ [2, 122]), falls zwischen den Kontakten eine geringere ORG erzielt werden könnte als durch Al-BSF.

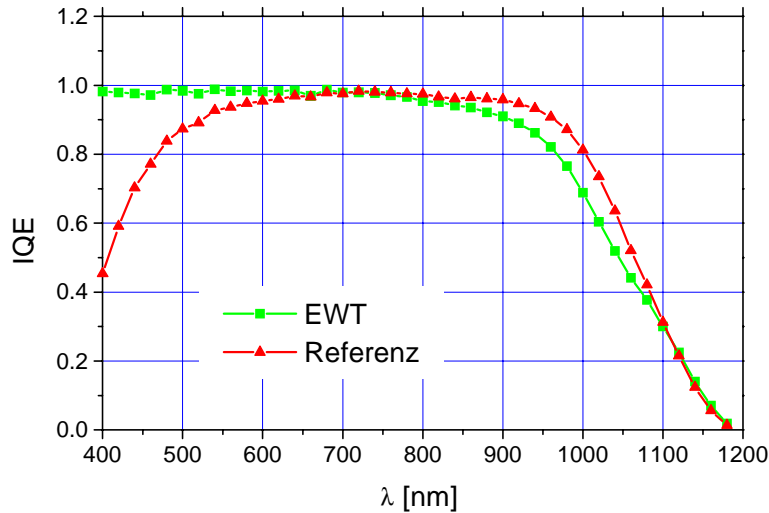


Fig. 94: IQE einer EWT-Zelle im Vergleich mit einer konventionellen Zelle. Beide Zellen bestehen aus Cz-Silizium, sind alkalisch texturiert mit Siliziumnitrid als ARC. Die Referenz hat ein ganzflächiges Al-BSF, die EWT-Zelle ein Fingergrid aus Ag/Al-Paste als Basiskontakt [99]. Der hochohmige Frontemitter der EWT-Zelle ermöglicht in Verbindung mit der Oberflächenpassivierung durch das LPCVD SiN eine hohe Quantenausbeute im kurzwelligen Teil des Spektrums. Im Langwelligen überwiegt die geringere ORG durch das BSF den Vorteil durch den zusätzlichen Rückseitenemitter.

Bei kleinen Basisdiffusionslängen ($L < 200 \mu\text{m}$) ist die effektive Diffusionslänge, die für die Höhe der Leerlaufspannung entscheidend ist, jedoch unabhängig von der Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit (Fig. 95) – zumindest bei herkömmlichen Zellen. Bei EWT-Zellen mit Rückseitenemitter kann die Basisoberfläche, die weniger als eine Diffusionslänge vom Rückseitenemitter entfernt ist, auch L_{eff} beeinflussen (vgl. Fig. 74).

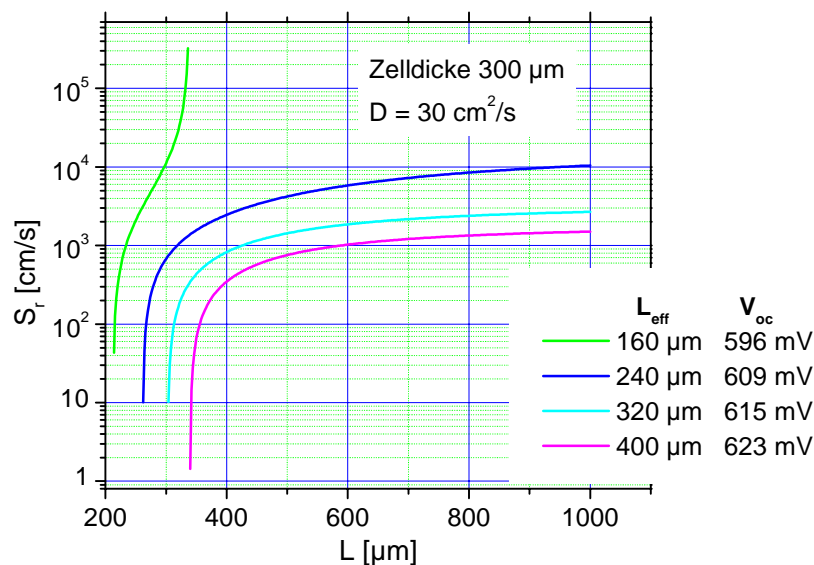


Fig. 95: Falls die Basisdiffusionslänge kleiner als 200 μm ist, hängt L_{eff} nicht von der Rückseiten-ORG S_r ab [140]. Die Leerlaufspannung, die von L_{eff} abhängt ist dann ebenfalls unabhängig von S_r (Gilt für konventionelle Zellen).

Eine Passivierung der Basisoberfläche für EWT-Zellen ist technologisch schwierig zu realisieren. Das für die Passivierung des Frontemitters verwendete SiN hat auf p-Silizium kaum passivierende Wirkung. Zur Passivierung von p-Typ Oberflächen wird erfolgreich [22, 90] thermisch aufgewachsenes SiO₂ verwendet. Für die industrielle Anwendung hat sich dieses Verfahren wegen hohem Zeit- und Energieaufwand noch nicht durchsetzen können; davon abgesehen führt die thermische Belastung (mehrere Stunden bei Temperaturen um 1000 °C) oft zur Degradation von Cz Silizium. Smith et al. [46] erreichten bei EWT-Zellen auf FZ Silizium mit Oxid-passivierter Oberfläche $V_{oc} = 623$ mV. In [141] werden verschiedene Verfahren zur Front und Rückseitenpassivierung untersucht, PECVD kann danach durchaus auch zur Passivierung von p-Typ Oberflächen geeignet sein, allerdings in anderer Zusammensetzung als für die Passivierung von n-Bereichen [87, 122].

Wie Fig. 96 zeigt, ist es wenig sinnvoll, nur einen Teil der p-Oberfläche zu passivieren, da der Wirkungsgradverlust nahezu unabhängig vom Anteil der unpassivierten p-Oberfläche ist. Da der Anteil der Basiskontakte ($S_r = 10^7$ cm/s) alleine schon 17 % beträgt, wurde auf weitere Passivierungsuntersuchungen verzichtet. Eine Getterwirkung durch Al-Kontakte konnte bei EWT-Zellen bisher nicht bestätigt werden (vgl. Kapitel 4.5.1).

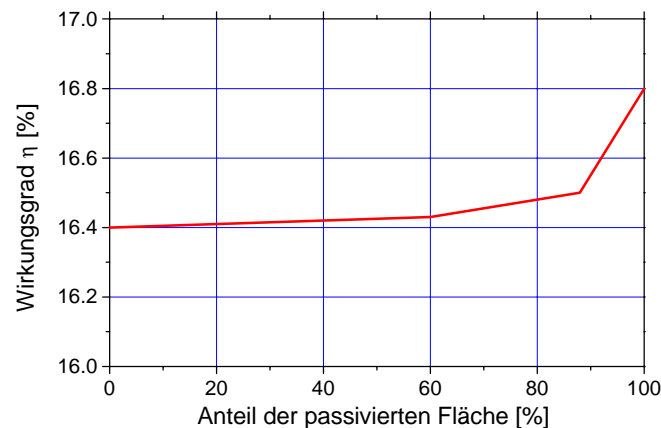


Fig. 96: Simulation (DESSISTM) des Wirkungsgrades in Abhängigkeit des passivierten Flächenanteils ($S_r = 10^7$ cm/s und 10^2 cm/s) an der Rückseite einer EWT-Zelle. Schon bei einem geringen Anteil (10 %) unpassivierter Fläche ist der Wirkungsgrad unabhängig von der Passivierung des übrigen Bereiches.

5.4.6 Basis und Emitteranteil auf der Rückseite

Wegen der erhöhten Quantenausbeute aufgrund des rückseitigen Emitters (Fig. 58) sollte der Emitterbereich möglichst breit sein (Fig. 97). Der dadurch mögliche Gewinn ist jedoch auf weniger als $0,5$ mA/cm² beschränkt (Kapitel 5.3.1). Messungen zum Linienwiderstand der Finger ergaben, daß der Linienwiderstand eines Emitterfingers mit 76 mΩ/cm ungefähr doppelt so groß ist wie der eines Basisfingers (38 mΩ/cm, Siebgeometrie siehe Fig. 33, Sieböffnung für beide Finger 400 μm). Um den Serienwiderstandsverlust in den Fingern zu minimieren, müßte der Emitterfinger folglich doppelt so breit wie der Basisfinger gedruckt werden. Daraus folgt eine optimierte Sieböffnung von 300 μm für den Basisfinger, 600 μm für den Emitterfinger und eine geringfügige Verringerung von b (um 100 μm) zugunsten von

e. Der Serienwiderstandsbeitrag der Finger würde sich dadurch um 12 % verringern. Da der Beitrag der Finger zu R_{serie} jedoch nur $0,2 \Omega\text{cm}^2$ beträgt, ist die Verringerung des Gesamtserienwiderstands durch optimierte Fingerbreiten eher zu vernachlässigen.

Bei schmalerem Basisbereich steigt der Serienwiderstandsanteil der Basis quadratisch mit der Entfernung c , eine Verbreiterung des Emitterbereiches um $200 \mu\text{m}$ erhöht den Serienwiderstandsbeitrag der Basis um $100 \text{m}\Omega\text{cm}^2$ ($\rho_{Basis} = 1 \Omega\text{cm}$), der Nettogewinn wäre also äußerst klein.

Außerdem zeigen realistische Betrachtungen, daß die Aufteilung der Flächenanteile hauptsächlich technologischen Überlegungen unterworfen ist, da die Distanz g durch die Genauigkeit der Siebdruckmaschine, die unvermeidliche Siebdehnung und die Verbreiterung der Al/Ag Paste sowie der Barrierenpaste vorgegeben wird. Die Freiheit zur Wahl von b und e ist dadurch sehr eingeschränkt.

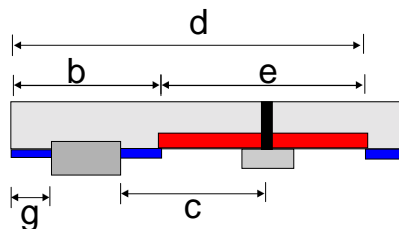


Fig. 97: Schema zur Bestimmung von Basis- und Emitterfläche auf der Zellrückseite. Der Justierabstand g ist durch die Siebdruckausrüstung vorgegeben. Der Abstand c bestimmt den Serienwiderstandsanteil durch die Basis (rot: Emitter, blau: Diffusionsbarriere).

5.5 Wirkungsgradpotential von EWT-Zellen

Der höchste an einer EWT-Zelle gemessene Füllfaktor betrug 72 %, oft wurden nur Werte zwischen 65 % und 70 % erreicht. Verglichen mit konventionellen Zellen, deren Füllfaktor in der Regel über 76 % liegt, bestehen hier durchaus noch Optimierungsmöglichkeiten. Durch Verbesserung des Füllfaktors von 71 % auf 75 % würde sich der Wirkungsgrad von jetzt 16 % auf fast 17 % erhöhen.

Der Füllfaktor wird von J_{02} , vom Shuntwiderstand und vom Serienwiderstand bestimmt. Wird zur pn-Rückseitendefinition die siebgedruckte Diffusionsbarriere verwendet, ist J_{02} mit $5 \cdot 10^{-8} \text{A/cm}^2$ ungefähr so groß wie bei konventionellen Zellen. Die experimentellen Ergebnisse lassen darauf schließen, daß für eine Verringerung von J_{02} kaum noch Optimierungspotential vorhanden ist, es sei denn durch Passivierung des rückseitigen pn-Übergangs mittels thermischem Oxid oder geeignetem Siliziumnitrid. Eine Verringerung von $5 \cdot 10^{-8} \text{A/cm}^2$ auf $1 \cdot 10^{-8} \text{A/cm}^2$ würde den Füllfaktor um knapp 3 Prozentpunkte erhöhen.

Unter Verwendung von Diffusionsbarriere und optischer Justiereinrichtung konnten Shuntwiderstände bis $1800 \Omega\text{cm}^2$ erreicht werden. Eine Erhöhung auf $10^5 \Omega\text{cm}^2$ würde den Füllfaktor nur um einen halben Prozentpunkt steigern. Der Optimierungsbedarf beim Shuntwiderstand kann folglich als gering eingestuft werden.

Der Serienwiderstand von über $1,3 \Omega\text{cm}^2$ (bester Wert bei EWT-Zellen mit hochohmigem Frontemitter) anstatt $0,7 \Omega\text{cm}^2$ (konventionelle Zelle) verringert den Füllfaktor um

3 Prozentpunkte. Optimierung von Fingerabstand, Emitterschichtwiderstand, Verbesserung der Fingerleitfähigkeit, Verzicht auf die Busbarregionen und höhere Basisdotierung würden zur Verringerung des Serienwiderstandes beitragen.

Neben dem Füllfaktor wäre auch bei der offenen Klemmenspannung eine Steigerung wünschenswert. Inwieweit eine Passivierung der Rückseite mittels thermischem Oxid eine Erhöhung von V_{oc} bewirkt, muß noch untersucht werden – ob sie wirtschaftlich sinnvoll ist, wäre im Erfolgsfall zu klären. Könnten 615 mV erreicht werden, d. h. 15 mV mehr als bisher gemessen wurden, stiege der mögliche Wirkungsgrad auf 17,5 % (unter Berücksichtigung einer Füllfaktorsteigerung auf 75 % und gleichbleibendem Kurzschlußstrom von 38 mA/cm²).

Auch der Kurzschlußstrom wird durch die Rekombinationsgeschwindigkeit an der Zellrückseite begrenzt. Die optischen Verluste betragen 1,8 mA/cm² [99], sind jedoch kaum noch zu verringern. Inwieweit die Rekombinationsverluste von 6,7 mA/cm² bei den betrachteten kleinen bis mittleren Minoritätsladungsträgerlebensdauern durch Reduzieren der ORG auf unter 10⁴ cm/s verringert werden können, muß ebenfalls noch untersucht werden.

Wird der in Kapitel 4.7 aufgeführte Prozeß beibehalten, wobei Fingerabstände und Metallisierung den Optimierungsrechnungen gemäß angepaßt werden, könnte wohl ein Wirkungsgrad von 16,5 % bis knapp 17 % erreicht werden.

5.6 Wirtschaftlichkeitsüberlegungen

Bei vergleichbarem Wirkungsgrad (16 % auf Cz-Silizium) werden für die Herstellung einer EWT-Zelle drei Prozeßschritte mehr benötigt als zur Herstellung einer konventionellen Zelle, dafür entfällt das Trennen des parasitären pn-Übergangs:

- + Erstellen der Verbindungslöcher
- + eine zusätzliche Diffusion
- + ein zusätzlicher Druck und Feuerschritt für die Diffusionsbarriere
- Trennen des parasitären pn-Übergangs entfällt

Die Justiergenauigkeitsanforderungen für das Drucken der drei ineinander verschachtelten Grids sind höher als für den Druck konventioneller Zellen. Da Zellen in der kommerziellen Fertigung aber ohnehin automatisch justiert werden müssen, fällt der für EWT-Zellen nötige Mehraufwand kaum ins Gewicht - auch ein mechanischer Anschlag erfüllt nach einmaliger Justierung die Genauigkeitsanforderung durchaus. Die höheren Anforderungen an gleichbleibende Siebgeometrie können entweder durch häufigeren Austausch der Drucksiebe oder durch Verwendung von Druckschablonen anstelle von Sieben erfüllt werden. Die Kosten für den zusätzlichen Druckschritt werden durch den eingesparten Prozeßschritt (Trennen des pn-Übergangs) kompensiert. Die zweite Diffusion verteuert die Zellherstellung um ca. 4 %.

Den zusätzlichen Kosten (25 - 100 % Steigerung im Vergleich zu konventioneller Zelle bei Wafer-zu-Zelle-Kosten) durch das Bohren der Verbindungslöcher steht die Einsparung bei der Modulherstellung (einfachere Verschaltung und geringere Abstände zwischen den Zellen) von bis zu 25 % der Gesamtmodulkosten gegenüber, so daß ein EWT-Modul bei Berücksichtigung der Fixkosten (z. B. Wafer) im schlechtesten Fall 25 % teurer ist als ein Modul aus herkömmlichen Zellen und im besten Fall etwa gleich teuer. Mit der in Fig. 98 gezeigten

Anordnung aus vielen Mikrolinsen [142] in Verbindung mit einem leistungsstarken Laser ließe sich die Bearbeitungszeit auf wenige Sekunden pro Wafer reduzieren. Eine Begrenzung durch thermische Schädigung wird erst erreicht, wenn alle 4000 Löcher in weniger als einer Sekunde gebohrt werden sollen (Kapitel 2.2.2).

Der Marktwert von EWT-Zellen wird nicht zuletzt auch durch ihr ästhetisch ansprechendes Aussehen erhöht (Minimodul in Fig. 104 und Fig. 105). Wie auch die erfolgreiche Markteinführung der POWER-Zelle gezeigt hat, könnten die ansprechenden optischen Eigenschaften den sonst neben dem Preis als einziges Kriterium geltenden Wirkungsgrad in den Hintergrund drängen.

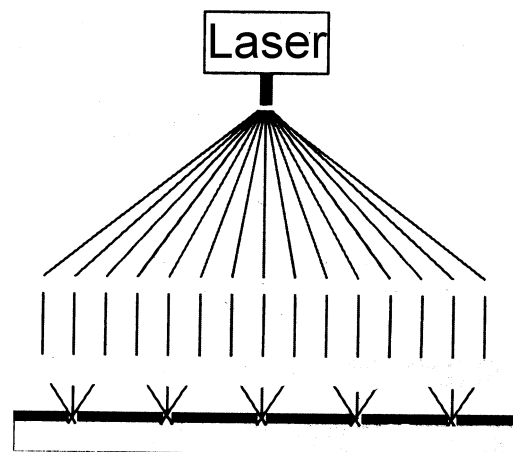


Fig. 98: Mögliche Anordnung zum Lasern der Verbindungslöcher. Der Laserstrahl wird mittels Beamsplitter aufgeweitet und anschließend durch eine Anordnung von Mikrolinsen so fokussiert, daß die Verbindungslöcher gebohrt werden können (aus [142]).

5.7 Schlußfolgerung

Nach Prüfung verschiedener Verfahren zur Herstellung von EWT Rückkontaktsolarzellen steht eine Prozeßsequenz zur Verfügung, die alle Voraussetzungen für die industrielle Herstellung erfüllt:

- Der Prozeß ist kostengünstig, auf kostenintensive Prozeßschritte wie thermische Oxidation, Photolithographie, Plasmaätzen wird verzichtet.
- Es wird eine hohe Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit gewährleistet, der Ausschuß ist äußerst gering, kritische Prozeßschritte wie die Justierung der ineinander verschachtelten Kontaktgrids können durch optische Justiereinrichtungen entschärft werden.
- Der Durchsatz ist hoch, im Versuchsaufbau jedoch noch durch das Bohren der Verbindungslöcher beschränkt.
- Der erreichbare Wirkungsgrad ist vergleichbar mit dem konventionell hergestellter Solarzellen.

Bei der Optimierung des Herstellungsprozesses sind die besonderen Charakteristika von EWT-Zellen berücksichtigt worden: Aufgrund des rückseitigen Emitters ist die offene

Klemmenspannung niedriger als bei konventionellen Zellen. Die kleinere offene Klemmenspannung kann jedoch - bei Anwendung eines hochwertigen Frontemitters zusammen mit einer Texturierung der Frontseite - durch den Gewinn im Kurzschlußstrom mehr als ausgeglichen werden.

Bei der Passivierung der Rückseite ist darauf geachtet worden, keine oberflächenschädigenden Prozeßschritte zu verwenden, jedoch wird auch auf eine spezielle Oberflächenpassivierung verzichtet. Deren Nutzen erweist sich in Berechnungen und Simulationen als sehr gering oder nicht nachweisbar – zumindest bei Diffusionslängen von weniger als der Hälfte der Zelldicke, wie sie für das für EWT-Zellen vorgesehene Silizium typisch sind.

Für die Optimierung wird wegen geringerer Materialstreuung Cz-Silizium verwendet. Auf multikristallinem Silizium kann die Anwendbarkeit des Prozesses ebenfalls gezeigt werden.

Auf monokristallinem Cz-Silizium wird mit diesem Prozeß – der sich in der Zahl der Prozeßschritte nur durch das Bohren der Verbindungslöcher, eine zweite Diffusion und einen zweiten Ätzschritt vom Prozeß herkömmlicher Solarzellen unterscheidet – ein bestätigter Wirkungsgrad von 15,8 % erreicht (bei einer offenen Klemmenspannung von 600 mV und einem Kurzschlußstrom von 37,9 mA/cm²). An Zellen aus multikristallinem Silizium werden Shuntwiderstände über 1000 Ωcm², offene Klemmenspannungen bis 584 mV und Kurzschlußströme bis 35,8 mA/cm² gemessen. Die beste multikristalline EWT-Zelle erreicht einen Wirkungsgrad von 14,0 % in Verbindung mit Wasserstoffpassivierung.

Durch Optimierung des Zelldesign (Schichtwiderstand, Basisdotierung und Fingerabstand) erscheint es realistisch einen Wirkungsgrad von knapp 17 % auf Cz-Silizium zu erreichen.

6. Kapitel - Modulverschaltung

Die auf der Rückseite liegenden Kontakte vereinfachen die Verschaltung einzelner EWT-Zellen zu Modulen erheblich, da keine Verbindung von Vorderseite zu Rückseite wie bei konventionellen Zellen erfolgen muß. Die EWT-Zellen können fast lückenlos aneinandergesetzt werden, hierdurch wird die Modulfläche optimal genutzt und ein optisch homogener Gesamteindruck erzielt. Im Folgenden werden verschiedene Verschaltungstechniken diskutiert und im Anschluß zwei Minimodule präsentiert, die aus jeweils vier $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Zellen bestehen.

6.1 Verbindung von Substrat und Zelle

Bei den bisher hergestellten EWT-Zellen mit 100 cm^2 Zellfläche liegt der Emitterbusbar in der Zellmitte, zwei Basisbusbars sind am Zellrand angeordnet. Für die Modulverschaltung ist ein Design günstiger, bei dem durch Drehen der Zelle jeweils die Basisbusbars der einen Zelle gegenüber den Emitterbusbars der nächsten Zelle zu liegen kommen (Fig. 99). Die Verbindung der Zellen untereinander könnte z. B. durch Versträngen der Rückseite erfolgen, wobei die Zellen schon fest mit dem Frontsubstrat verbunden sein sollten.

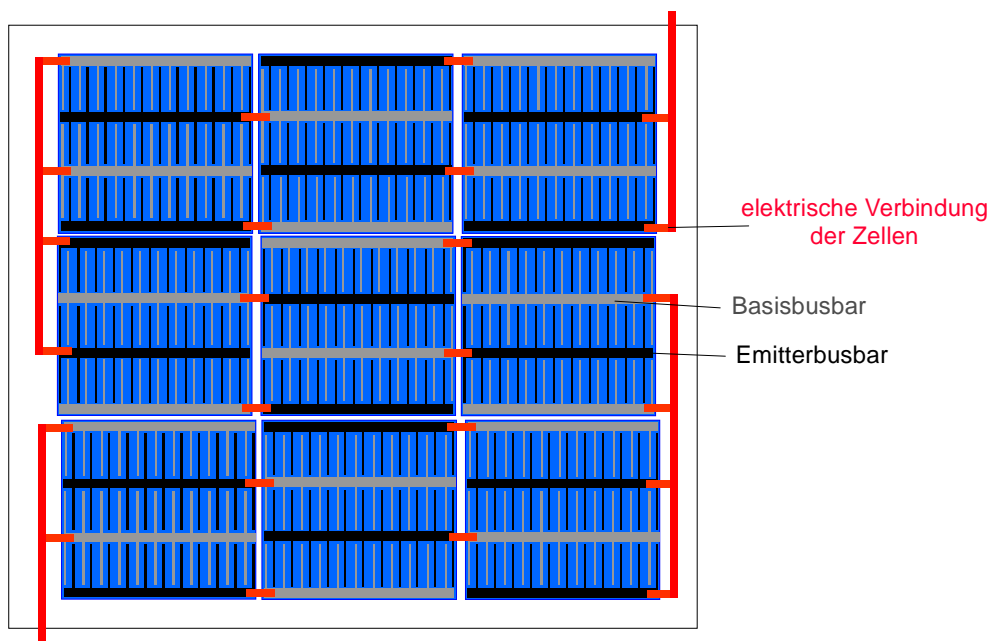


Fig. 99: Verschaltungsbeispiel: 9 EWT-Zellen werden zu einem Minimodul verbunden. Die Zellen könnten nahezu lückenlos aneinandergesetzt werden. Das geplante 36 Zellen Modul wird so hergestellt werden.

Sind die Kontaktschienen in der Modulrückseite eingearbeitet [5], können die Zellen mittels leitfähigem Epoxy-Kleber aufgeklebt werden. Es stehen auch aufspritzbare Lötpasten zur Verfügung: Die Lötpaste wird auf die Kontaktschienen aufgespritzt, die Zellen werden aufgelegt und die Modulrückseite kurzfristig auf 180 °C erhitzt, so daß die Lötpaste schmilzt und beim Erstarren die Verbindung zwischen Modulrückseite und Zelle herstellt.

6.2 Einfluß der Verglasung auf den Wirkungsgrad

Wegen der Grenzflächenreflexion (> 4 % bei unbehandelten Glasflächen) wird in der Regel eine Folie aus EVA (Brechungsindex wie Glas) zwischen Solarzelle und Modulverglasung gelegt. Im Laminator schmilzt die Folie, die entstehende luft- und blasenfreie Zwischenschicht sichert eine gute optische Ankopplung und verringert die Korrosionsgefahr.

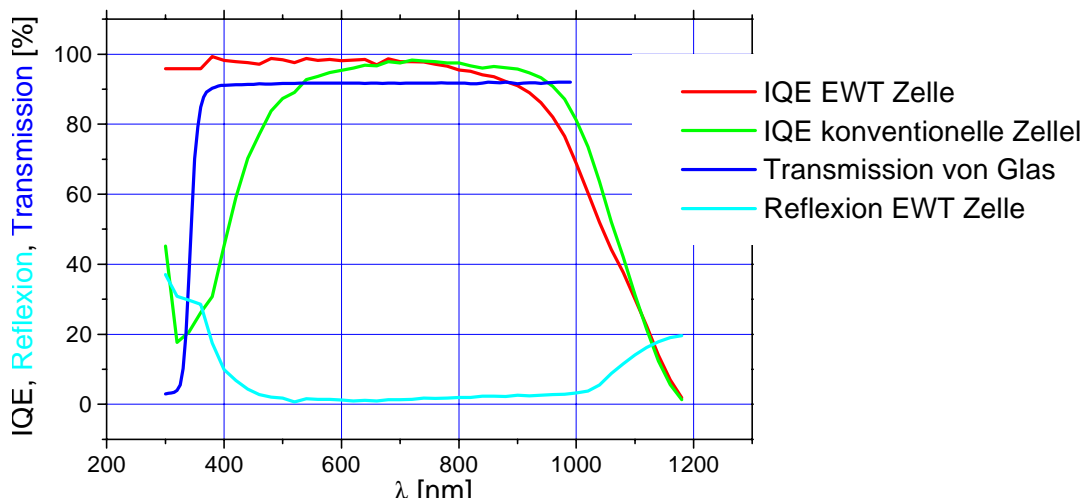


Fig. 100: Transmissionskurve der Modulverglasung [143] und interne Quantenausbeute zweier Solarzellen mit unterschiedlichem Frontemitter. Die IQE der konventionellen Zelle (hochdotierter Emitter) fällt noch im Transmissionsbereich des Glases deutlich ab während die IQE der EWT-Zelle (hochwertiger Frontemitter mit Oberflächenpassivierung) noch über die Absorptionskante des Glases hinaus konstant bleibt.

Ebenfalls möglich ist eine Vergütung beider Glasoberflächen mit Antireflexschichten [144]. Die Langzeitstabilität des Modules wird jedoch durch die enthaltene Luft und dadurch mögliche Feuchtigkeitsbildung verringert.

Um abzuschätzen inwieweit ein hochwertiger Frontemitter nach Moduleinbettung noch nützlich ist, wurde die Transmission eines Modulglases bestimmt [143]. Aus der Messung in Fig. 100 ergibt sich, daß der hochwertige selektive Frontemitter der EWT-Zelle auch nach Einbettung ins Modul einen deutlichen Stromgewinn gegenüber dem hochdotierten Emitter der konventionellen Zelle ermöglicht.

6.3 Mögliche Substrate

Die Modulvorderseite kann wie auch bei konventionellen Zellen aus einer witterungsbeständigen Glasplatte bestehen, die mittels einer EVA Folie optisch an die

Solarzelle angekoppelt wird. Die Modulrückseite kann entweder ebenfalls aus einer Glasplatte bestehen (was die Nutzung der Albedostrahlung durch den rückseitigen Emmitter von EWT-Zellen ermöglicht) oder aus jedem anderen Material (z. B. auch PVC-Folie). Auf Glas lassen sich die Kontaktschienen mittels Siebdruck aufdrucken und durch leitfähige Epoxy-Kleber, die ebenfalls aufgedruckt werden, mit den Solarzellen verbinden. Das Trocknen des Klebers kann gleichzeitig mit dem Verschweißen der EVA Folie im Laminator erfolgen.

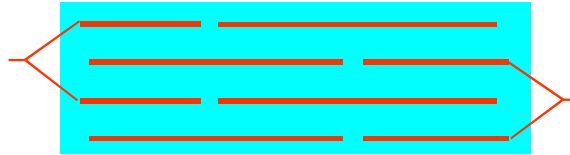


Fig. 101: Anordnung der Leiterbahnen auf dem Glassubstrat eines 3 Zellen Minimoduls. Die Leiterbahnen können z. B. mittels Siebdruck aufgedruckt werden.

Unter Verzicht auf die Lichteinkopplung auf der Zellrückseite können auch Epoxy- oder Glasfaserplatten als Modulrückseite dienen. Auf diese werden – wie bei der Herstellung von Leiterplatten für elektronische Schaltungen – die Leiterbahnen galvanisch abgeschieden (Fig. 101).

Die Leiterbahnen können nahezu die gesamte Fläche bedecken, solange durch eine isolierende Zwischenschicht gewährleistet ist, daß die Leiterbahnen keinen Kurzschluß mit den Fingern des jeweils anderen Kontakts verursachen (Fig. 102).



Fig. 102: Modulrückseite aus einer Glasfaserplatte mit breiten Leiterbahnen, die durch eine isolierende Schicht (Lack oder Folie) von den Fingern des jeweils anderen Kontakt elektrisch getrennt sind.

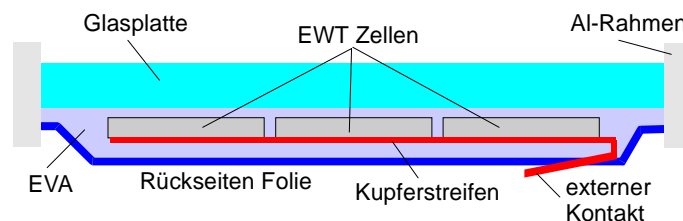


Fig. 103: Schnitt durch ein EWT-Modul, die Zellen wurden mit Kupferbändern verbunden und anschließend zwischen zwei EVA Schichten eingebettet. Die Modulvorderseite besteht aus einer Glasplatte, die Rückseite aus einer reißfesten durchsichtigen Folie. Ein Rahmen aus Aluminiumprofil erhöht die Stabilität.

Für die beiden ersten Module wurden jeweils 4 Zellen mit Kupferbändern elektrisch verbunden. Die Zellen wurden zwischen zwei EVA Folien gelegt, mit einer Glasplatte als Modulvorderseite und einer reißfesten durchsichtigen Folie auf der Rückseite. Die 5 Schichten wurden im Laminator unter Vakuum verschweißt und mit einem stabilen Aluminiumprofilrahmen versehen (Fig. 103).

6.4 Minimodule

Für Präsentationszwecke wurden zwei Minimodule aus jeweils 4 EWT-Zellen hergestellt. Einmal wurde multikristallines mechanisch walzentexturiertes Silizium verwendet, wobei der Sägeschaden alkalisch entfernt wurde, so daß die Kornstruktur sichtbar blieb. Für die optische Erscheinung ist das nicht unbedingt ein Nachteil wie das Foto in Fig. 104 zeigt. Beim zweiten Modul wurde alkalisch texturiertes Cz-Silizium verwendet – die Oberfläche ist einheitlich tiefblau und sehr homogen (Fig. 105). Bei beiden Modulen hätte der Abstand zwischen den Zellen noch verringert werden können.



Fig. 104: Minimodul mit vier mechanisch texturierten EWT-Zellen aus multikristallinem Silizium.

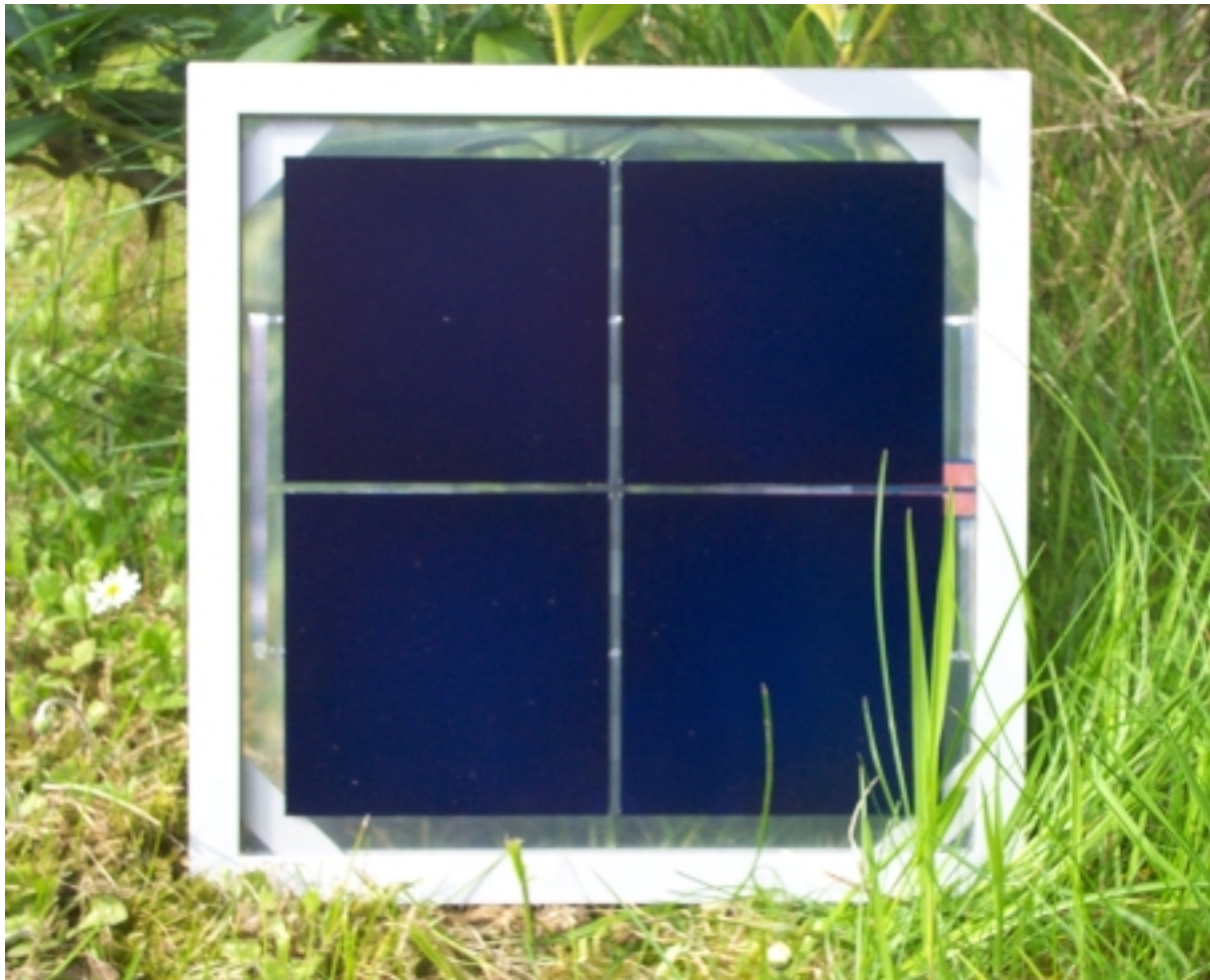


Fig. 105: Minimodul mit vier EWT-Zellen aus alkalisch texturiertem Cz-Silizium.

Das Cz-Modul wurde freundlicherweise von ECN (Niederlande) laminiert und auch vermessen. Nach Einbetten und Verschalten erreichen die vier Zellen einen Wirkungsgrad von 14,0 % bei $V_{oc} = 2,4$ V und $I_{sc} = 3,6$ A, wobei beim Wirkungsgrad nicht die gesamte Modulfläche, sondern nur die Zellfläche eingerechnet wurde (Fig. 106). Dies ist durchaus gerechtfertigt, da die Zellen tatsächlich praktisch lückenlos aneinandergereiht werden könnten.

Um den Einfluß der Rückseitenbeleuchtung abzuschätzen, wurden Kurzschlußstrom und offene Klemmenspannung mit und ohne Rückseitenbeleuchtung bei einer Freiluftmessung verglichen. Die Rückseitenbeleuchtung erfolgte dabei mittels eines gewöhnlichen Spiegels. Die Messungen wurden Ende April bei unbedecktem Himmel um die Mittagszeit durchgeführt. Jedoch erreichten V_{oc} und J_{sc} nicht ganz die Werte, die bei der kalibrierten Messung am Sonnensimulator ermittelt worden waren. Bei voller Rückseitenbeleuchtung stieg I_{sc} von 3,5 A ohne Rückseitenbeleuchtung auf 3,9 A und V_{oc} von 2,31 V auf 2,35 V (Cz-Modul). Beim Modul aus multikristallinen Zellen stieg der Strom von 3,1 A auf 3,3 A und die Spannung von 1,85 V auf 1,90 V. Konstanten Füllfaktor vorausgesetzt, würde dies einer Wirkungsgradsteigerung durch die zusätzliche Rückseitenbeleuchtung von 13 % (rel.) beim Cz-Modul und 9 % (rel.) beim mc-Modul entsprechen [20, 64, 145].

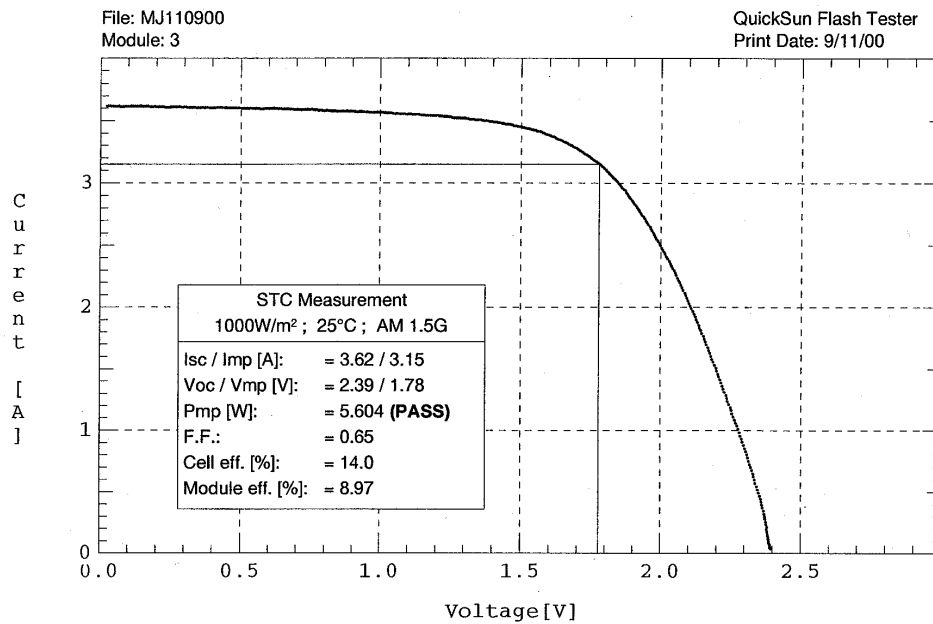


Fig. 106: Meßkurve des 4 Zellen Minimoduls aus Cz-Silizium. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades (14,0 %) wurde nur die Fläche der Zellen und nicht die gesamte Modulfläche miteingerechnet.

6.5 Zusammenfassung

Im letzten Kapitel wurden einige Vorschläge zur Verschaltung von EWT-Zellen zu Modulen präsentiert, die zur einfacheren Verschaltung beitragen könnten. Die elektrische Verbindung der Zellen erfolgt am besten über Kontaktschienen, die in die Modulrückseite eingearbeitet sind, und mit denen die EWT-Zellen elektrisch leitend verklebt oder verlötet werden.

Außerdem wurden zwei Minimodule präsentiert, die das ästhetisch ansprechende Aussehen von EWT-Modulen verdeutlichen. Bei diesen zwei Modulen erfolgte die Verschaltung durch verzinnte Kupferstreifen. Das Cz-Modul erreichte einen Wirkungsgrad von 14,0 %. Durch zusätzliche Beleuchtung von der Rückseite ließ sich der Wirkungsgrad der verwendeten EWT-Zellen um bis zu 13 % steigern.

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein industriell anwendbarer, kostengünstiger Prozeß zur Herstellung von Emitterverbund-Rückkontaktsolarzellen entwickelt. Rückkontaktsolarzellen erleichtern die Verschaltung von einzelnen Solarzellen zu Modulen. Dadurch tragen sie dazu bei, die Kosten einer Photovoltaikanlage zu senken. Werden beide Kontakte auf die Zellrückseite verlegt, sehen die Zellen einheitlich homogen aus und können praktisch lückenlos aneinandergesetzt werden. Der optische Eindruck hat speziell im Fassadenbau große Bedeutung, Rückkontaktsolarzellen erschließen daher auch neue Märkte.

Die hier untersuchten Emitterverbundzellen basieren auf dem Emitter-Wrap-Through (EWT)-Konzept. Dabei wird der Frontemitter durch zahlreiche kleine Löcher im Wafer mit dem auf der Rückseite angeordneten Emitterkontaktgrid verbunden. Aufgrund der elektrischen Verbindung von Vorder- und Rückseite läßt sich für EWT-Zellen, im Gegensatz zu Hocheffizienz-Rückkontaktzellen, auch kostengünstiges Silizium mit kleiner Minoritätsladungsträgerlebensdauer verwenden.

Aufgrund der hier beschriebenen Entwicklung konnte erstmals ein Herstellungsprozeß für EWT-Zellen veröffentlicht werden, der gänzlich ohne Photolithographieschritte auskommt, und dennoch einen hohen Wirkungsgrad liefert. Die optimale Prozeßsequenz, die nur auf etablierte, industrietaugliche Prozeßschritte zurückgreift, ergab sich aus dem Vergleich verschiedener Prozeßtechniken.

Ein Nd-YAG Laser erwies sich zum Bohren der Verbindungslöcher als geeigneter als die Verwendung einer konventionellen Wafersäge, da die von der Säge auf der Zellrückseite erzeugte Grabenstruktur die zuverlässige Bedeckung mit einer Diffusionsbarrierschicht verhindert. Die Trennung von p- und n-Bereichen auf der Zellrückseite durch eine Diffusionsbarriere führte zu mehr als 30 mV höherer Leerlaufspannungen verglichen mit Verfahren, die den Emitter lokal entfernen. Zum lokalen Entfernen des Emitters wurde sowohl die Wafersäge, als auch ein reaktives Plasma eingesetzt, wobei hier die siebgedruckten Kontakte als Ätzbarriere dienten.

PECVD Siliziumnitrid eignet sich als Diffusionsbarriere, hat jedoch den Nachteil, daß die SiN-Schicht nur ganzflächig abgeschieden werden kann und deshalb in zusätzlichen Prozeßschritten teilweise wieder entfernt werden muß. Die Trennung von p- und n-Bereichen durch Aufdrucken einer diffusionsverhindernden Siebdruckpaste erspart diese zusätzlichen Prozeßschritte und vereinfacht den Prozeß dadurch deutlich. Die zuverlässige elektrische Trennung von rückseitigen p- und n-Bereichen ist der wichtigste Schritt bei der Herstellung einer Emitterverbund-Rückkontaktsolarzelle; wegen der Bedeutung und aufgrund der großen Vereinfachung, die die Entwicklung der siebgedruckten Diffusionsbarriere für die Herstellung von EWT-Zellen bedeutet, wurde dieser Prozeßschritt zum Patent angemeldet.

Die Emitterdiffusion erfolgte durch Gasphasendiffusion, da nur so die notwendige hohe Leitfähigkeit innerhalb der Verbindungslöcher zu realisieren war. Durch Verwendung eines Zwei-Stufen-Emitters, der bei EWT-Zellen keine zusätzlichen Justierschritte benötigt, wurde in Verbindung mit einer texturierten Zellvorderseite eine Kurzschlußstromdichte von $37,9 \text{ mA/cm}^2$ auf Cz- und von $35,8 \text{ mA/cm}^2$ auf multikristallinem Silizium mit jeweils 100 cm^2 Zellfläche erreicht. Der größte Gewinn gegenüber konventionellen Solarzellen wurde dabei durch die bei EWT-Zellen nicht vorhandene Abschattung erzielt.

Die Prozeßoptimierung wurde von Computersimulationen und Berechnungen zum Serienwiderstand begleitet. Es stellte sich dabei heraus, daß die geringere Leerlaufspannung von EWT-Zellen im Vergleich zu konventionellen Zellen tatsächlich konzeptbedingt ist, und durch den zusätzlichen Rückseitenemitter verursacht wird.

Mittels ortsaufgelöster thermographischer Aufnahmen konnte gezeigt werden, daß die Ursache für kleine Shuntwiderstände unabhängig von der Kontaktgeometrie der EWT-Zelle ist. Die teilweise beobachteten niedrigen Werte für den Shuntwiderstand der Zellen erhöhten sich durch Einführen geeigneter Prozeßbedingungen auf über $1000 \Omega\text{cm}^2$. Damit beeinträchtigten sie den Wirkungsgrad nur noch marginal. Die oft im Zusammenhang mit Rückkontaktzellen erwähnte Erhöhung des Sättigungsstroms mit Idealität zwei wurde ebenfalls festgestellt, konnte jedoch durch Verwendung der siebgedruckten Diffusionsbarriere deutlich verringert werden. Der Wirkungsgrad der hier untersuchten und hergestellten Emitterverbund-Rückkontaktzellen war hauptsächlich durch den Serienwiderstand von über $1,3 \Omega\text{cm}^2$ limitiert, der den Füllfaktor auf etwa 70 % begrenzte. Die beiden Hauptbeiträge des Serienwiderstands stammten aus dem Frontemitter und aus dem Widerstand in der Basis. Durch Verringern des Fingerabstandes erscheint es daher möglich, den Serienwiderstand noch weiter zu reduzieren und damit einen Wirkungsgrad von annähernd 17 % zu erreichen.

Als Ergebnis der dreijährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit kann ein industriell einsetzbarer Prozeß zur Herstellung von kostengünstigen Emitterverbund-Rückkontaktsolarzellen präsentiert werden. Nach diesem Prozeß hergestellte EWT-Solarzellen aus Cz-Silizium mit einer Fläche von 100 cm^2 erreichten einen Wirkungsgrad von 15,8 % und damit den höchsten bisher veröffentlichten, unabhängig bestätigten Wirkungsgrad, der auf EWT-Zellen mit Siebdruckmetallisierung und unter Verzicht auf Photolithographieschritte erzielt wurde. Auch wurde mit diesem Wirkungsgrad eines der Projektziele des EU-„ACE Designs“-Projekt erreicht. Auf multikristallinem Silizium wurde ein Wirkungsgrad von 14,0 % erzielt. Dies ist ebenfalls der höchste Wert, der bisher mit einem vergleichbar einfachen Prozeß erreicht wurde. Zwei Präsentationsminimodule aus jeweils vier multi- und vier einkristallinen EWT-Zellen bestätigen das ästhetisch ansprechende Aussehen von EWT-Rückkontaktsolarzellen.

Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Prozeß wurde ein Grundstein für weitere Optimierungsuntersuchungen an EWT-Zellen im Rahmen des „ACE Designs“ EU-Nachfolgeprojekts „Advantage“ gelegt. Darin soll die Oberflächenpassivierung der Rückseite und die industrietaugliche Verschaltung von EWT-Zellen zu Modulen untersucht werden.

Mit zwei mittelständischen Solarzellenunternehmen werden im Moment Verhandlungen über Lizenzen für die Herstellung der hier entwickelten Zellen geführt; innerhalb der nächsten zwei Jahre beginnt voraussichtlich die industrielle Fertigung der ersten EWT-Solarzellen.

Anhang

Simulationsprogramme PC1D und DESSIS™

Die Serienwiderstandsbeiträge durch Finger- und Emitterschichtwiderstand lassen sich auch ohne Computer berechnen. Sollen hingegen der Einfluß von BSF, Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit am pn-Übergang und spezifischem Widerstand der Basis bestimmt werden, ist die Lösung der drei nichtlinearen Halbleitergleichungen (Kontinuitätsgleichung, Poisson'sche Gleichung und Stromgleichung) jeweils für Elektronen und Löcher auf numerischem Wege nötig. Anders als im Zwei-Dioden-Modell werden tatsächlich die allgemeinen Differentialgleichungen, die den Halbleiter beschreiben, gelöst; dadurch wird die Berechnung von Problemen ermöglicht, die im Zwei-Dioden-Modell gar nicht enthalten sind. In einer Dimension erfüllt diese Aufgabe das Simulationsprogramm PC1D [125], das sich sehr gut für die Beschreibung konventioneller Zellen eignet (Fig. 107). Der Einfluß der Diffusionslänge und der Antireflexschicht auf den Strom und die IQE lassen sich mit PC1D schnell und einfach bestimmen.



Fig. 107: Eindimensionales Modell des Simulationsprogramms PC1D. Ein rückseitiger Emitter läßt sich zwar einbauen, nicht jedoch der pn-Übergang an der rückseitigen Oberfläche. Shunt und Serienwiderstände können extern angehängt werden.

Das mächtige Programmpaket DESSIS™ [129] ermöglicht auch die Simulation in zwei und drei Dimensionen. Dabei wird das Modell durch ein Gitter in quadratische bzw. kubische Unterzellen zerlegt, an deren Eckpunkten die 6 Halbleitergleichungen numerisch berechnet werden. Die Simulation der Einheitszelle einer Siebdruck-EWT-Zelle erfordert allerdings so viele Gitterpunkte, daß eine Berechnung in drei Dimensionen an der beschränkten

Rechnerleistung und -zeit scheidet. Im Modell werden die Löcher der EWT-Zelle daher zu Schlitzten und der Einfluß der Busbars muß extra bestimmt werden (Fig. 108).

Für die Berechnungen wurden nachfolgend aufgelistete Annahmen gemacht. Diese sind teilweise der Literatur [2, 146] entnommen, oder stammen aus Messungen an konventionell hergestellten Zellen. Emitterprofile werden als Errorfunktion beschrieben, Schichtwiderstand und Dotierung wurden mit DESSISTM oder PC1D berechnet. Justierabstände, Mindestbreite der Kontakte und die Rekombinationsgeschwindigkeit an der Rückseite sind realen Zellen entnommen. In PC1D wurde für die Reflexion die Messung einer alkalisch texturierten EWT-Zelle verwendet.

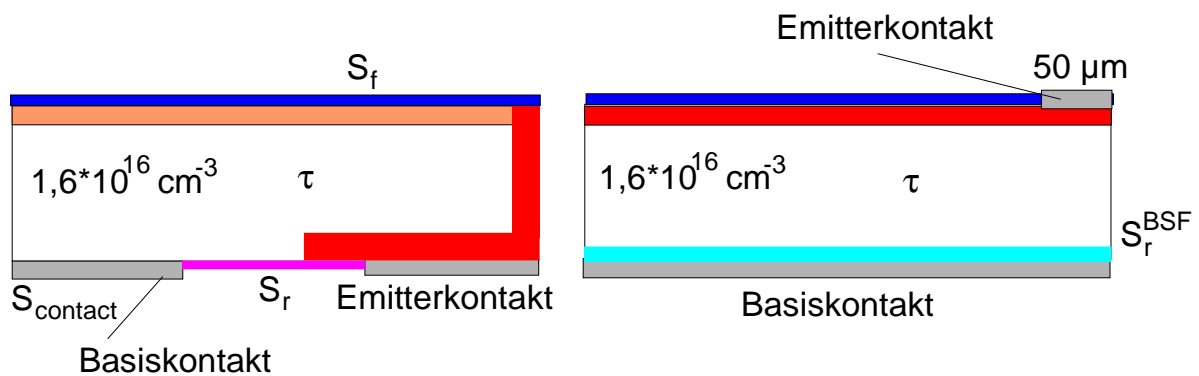


Fig. 108: Modelle in DESSISTM für die Einheitszelle von EWT- (links) und konventioneller Zelle (rechts). Modellbreite jeweils 1000 µm, Zelldicke 300 µm

Tabelle 6-1: Parameter für die Computersimulationen mit DESSIS und PC1D

		Wert	
N_b	Grunddotierung, p-leitend	$1,6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$\rho = 1 \text{ } \Omega\text{cm}$
D	Diffusionskonstante	$30 \text{ cm}^2/\text{s}$	
μ_n	Beweglichkeit Minoritäten	$1200 \text{ cm}^2/\text{V}$	
L	Diffusionslänge im Bulk	$150 \text{ } \mu\text{m}$	
S_r	Rückseitenrekombinationsgeschwindigkeit	EWT: $3 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ konv. Zelle (BSF): 800 cm/s	
$S_{contact}$	ORG am Kontakt	10^6 cm/s	
W	Waferdicke	$300 \text{ } \mu\text{m}$	

Diffusionskonstante D und Beweglichkeit μ sind über die Einsteinrelation verknüpft:

Gleichung A-1
$$D_{n,p} = \frac{\mu_{n,p} \cdot kT}{q}$$

Diffusionslänge und Lebensdauer

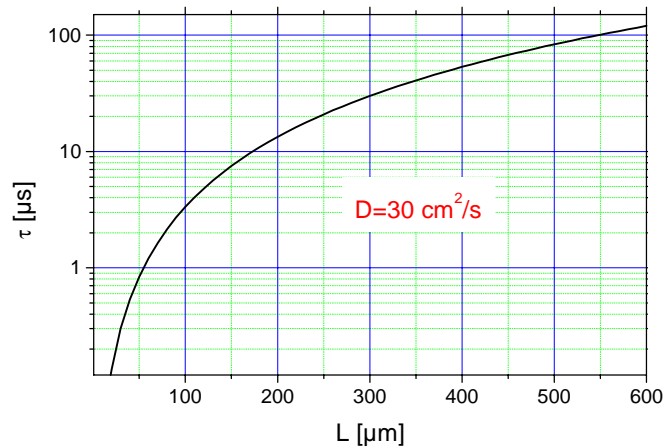


Fig. 109: Zusammenhang zwischen Lebensdauer τ und Diffusionslänge L nach Formel A-2.

Gleichung A-2
$$\tau = \frac{L^2}{D}$$

Für die effektive Lebensdauer τ_{eff} gilt [140, 147]:

Gleichung A-3
$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{base}} + \frac{1}{\tau_{surface}}$$

mit Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S und Oberflächenlebensdauer $\tau_{surface}$:

Gleichung A-4
$$\frac{1}{\tau_{surface}} = \frac{2 \cdot S}{W} + \frac{W^2}{\pi^2 D}$$

Umrechnung von spezifischem Widerstand in Schichtwiderstand:

Gleichung A-5
$$\rho_{schicht} = \frac{\rho_{spez}}{W}$$

Ergebnis der Eichmessung

Tabelle 6-2: Werte der Eichmessung von Zelle #3 (Cz-Silizium, pn-Bereichsdefinition mittels siebgedruckter Diffusionsbarriere) am JRC in Ispra ohne spektrale Korrektur

Simulator	Spectrolab/W in LAPSS21	Operator	W. Zaaiman
CellSerialNo	UK533	Reference Cell	PX201C
Mean Irradiance	1029 W/m ²	Calibration Value	123,3 mV
Cell Temperature	25,1 °C	RefCell Temperature	23,8 °C
Cell Area	10 000 mm ²	RefCell Area	399 mm ²
I_{sc}	3,84 A	V_{oc}	600 mV
I_{mpp}	3,39 A	V_{mpp}	474 mV
P_{max}	1,61 W	Fillfactor	69,6 %
Cell Efficiency	16,1 %		

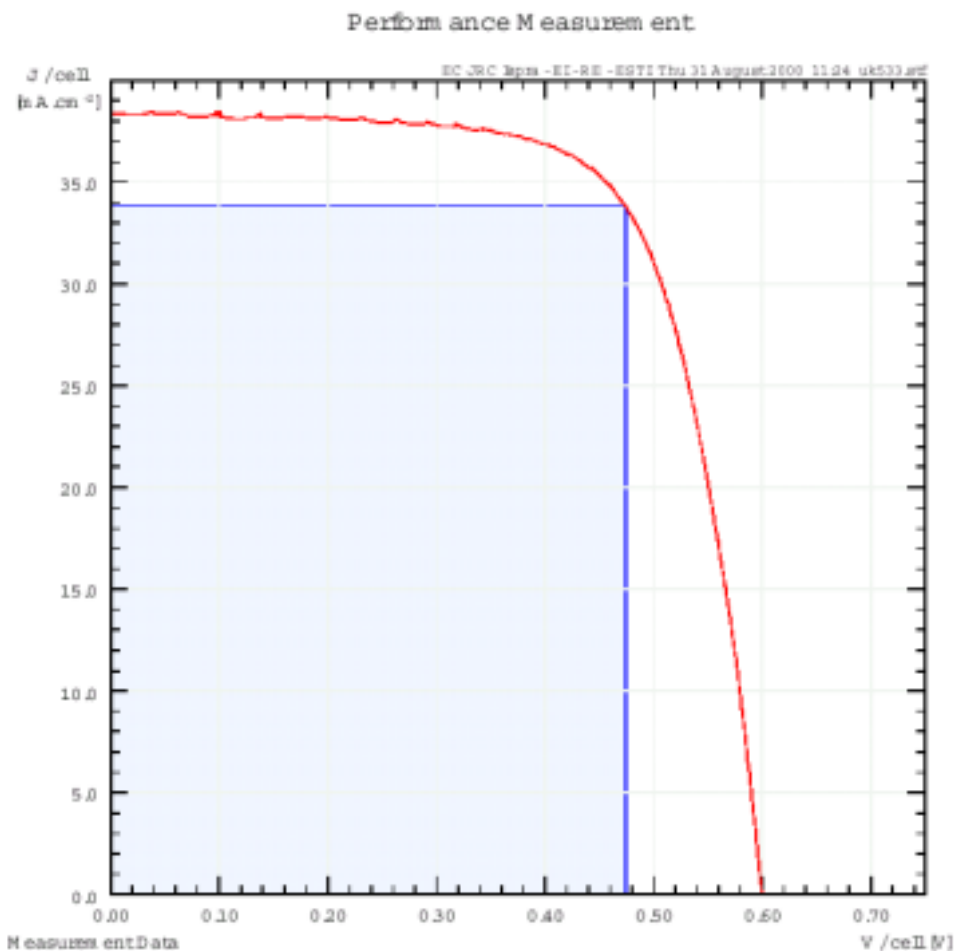


Fig. 110: Eichmessung von Zelle #3 (ohne spektrale Korrektur)

Tabelle 6-3: Eichmessung von Zelle #3 nach spektraler Korrektur

	vor SR-Korrektur	nach SR-Korrektur (STC Werte)
V_{oc} [mV]	600	600
I_{sc} [A]	3.844	3.785
V_{mpp} [mV]	474.3	474.3
I_{mpp} [A]	3.385	3.333
P_{max} [W]	1.606	1.581
Zellwirkungsgrad [%]	16.06	15.81
Füllfaktor [%]	69.61	
Zellgröße [cm ²]	100	
MMF	0.9847	

Liste der Symbole

α	Absorptionskoeffizient
η	Wirkungsgrad
λ	Wellenlänge
μ	Ladungsträgerbeweglichkeit
σ	elektrische Leitfähigkeit
τ	Lebensdauer
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand oder auch Schichtwiderstand
c	Achsenabschnitt
m	Steigung
D	Diffusionskonstante
FF	Füllfaktor
I_{01} und I_{02}	Sättigungsströme im Zwei-Dioden-Modell
I_{sc}	Kurzschlußstrom
I_{mpp}	Strom am optimalen Arbeitspunkt
I_L	Strom aufgrund von Beleuchtung
I bzw. J	Strom und Stromdichte
k	Boltzmann-Konstante
L	Diffusionslänge in der Basis
L_{eff}	effektive Diffusionslänge
L_T	Transportlänge
n	Brechungsindex von Antireflexschichten oder Idealitätsfaktor im Zwei-Dioden-Modell
n_i	intrinsische Ladungsträgerkonzentration
N	Ladungsträgerkonzentration durch Dotierung (Basis oder Emitter)
q	Elementarladung
R_{serie}	Serienwiderstand
R_{shunt}	Shuntwiderstand
S	Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit
T	Temperatur
U	Spannung
U_T	Temperaturspannung ($U_T = 0,02586$ V bei $T = 300$ K)
V_{oc}	Offene Klemmenspannung oder Leerlaufspannung
V_{mpp}	Spannung am optimalen Arbeitspunkt
W	Waferdicke
x_j	Eindringtiefe
θ	Spitzenwinkel bei Texturierung, $\theta = 41^\circ$ bei alkalischer Textur

Literaturverzeichnis

- [1] O. Langniß, J. Luther, J. Nitsch und E. Wiemken, *Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung - Ein solares Langfristszenario für Deutschland*, DLR Institut für Technische Thermodynamik und FhG ISE, Freiburg und Stuttgart, 1998
- [2] A. Goetzberger, V. Voß und J. Knobloch, *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Stuttgart: Teubner Taschenbücher, 1994
- [3] M. A. Green, *World Solar Challenge 1993: The Trans-Australian Solar Car Race*, Progress in Photovoltaics, **2**, 1994, S. 73
- [4] Verkaufsinformationen, *Verkaufsumfrage bei Siemens, Kyocera, BP Solar, Shell*, 2000
- [5] J. M. Gee, *Simplified Module assembly using back-contact crystalline silicon solar cells*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim, California 1997, S. 1085
- [6] J. M. Gee, *Emitter Wrap-Through Silicon Solar Cell*, Proc. 23th IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 265
- [7] R. Hall und T. Soltys, *Polka Dot Solar Cell*, Proc. 14th IEEE PVSC 1980, S. 550
- [8] E. V. Kerschaver, S. D. Wolf und J. Slufcik, *Towards back contact silicon solar cells with screen printed metallisation*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 209
- [9] A. Schönecker, H. H. C. d. Moor, A. Burgers, A. Weeber, J. Hoornstra, W. Sinke, P.-P. Michiels und R. A. Steeman, *An industrial multi-crystalline EWT-solar cell with screen printed metallisation*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1998, S. 796
- [10] O. Leistiko, *The Waffle: A new photovoltaic diode geometry having high efficiency and backside contacts*, Proc. 1st WCPEC, Hawaii 1994, S. 1462
- [11] T. Warabisako, K. Matsukuma, S. Kokunai, Y. Kida, T. Uematsu, H. Ohtsuka und H. Yagi, *A 16.8 % Efficient, 100 cm² polycrystalline silicon solar cell with triode structure*, Proc. 11th EPVSEC, Montreux, Suisse 1992, S. 172
- [12] K. Blaschek, W. Jooß, R. Tölle, T. M. Bruton, P. Fath und E. Bucher, *17 % efficient back contact buried contact solar cell*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1124
- [13] J. Eguren, J. D. Alamo, A. Cuevas und A. Luque, *High efficiency p⁺nn⁺ bifacial solar cells*, IEEE Trans Electr Dev, 1981, S. 1343
- [14] J. O. Schumacher, J. Dicker, S. Glunz, C. Hebling, J. Knobloch, W. Warta und W. Wettling, *Characterization of silicon solar cells with interdigitated contacts*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997, S. 71
- [15] J. H. Bultman, M. W. Brieko, A. R. Burgers, J. Hoornstra, A. C. Tip und A. W. Weeber, *Interconnection through vias for improved efficiency and easy module*

- manufacturing of crystalline silicon solar cells*, Proc. 11th PVSEC, Sapporo 1999, S. 921
- [16] D. D. Smith und J. M. Gee, *Review of back contact silicon solar cells for low cost application*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1104
- [17] P. Fath, R. Kühn, A. Boueke, E. Bucher und H. Nussbaumer, *Semitransparent POWER solar cells: Overview and latest results*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1930
- [18] R. Tölle, *Herstellung und Charakterisierung kristalliner low-cost Silizium Solarzellen*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 1997
- [19] C. Gerhards, *Dissertation erscheint 2001*, Dissertation, Universität Konstanz, 2001
- [20] G. Sala, A. Luque, M. Calleja und S. Lopez-Rosero, *Performance of an albedo collecting bifacial flat module*, Proc. 17th IEEE PVSC, New York 1984, S. 507
- [21] T. Warabisako, K. Mathukuma, S. Kokunai, Y. Kida, T. Uematsu und H. Yagi, *Bifacial multicrystalline silicon solar cells*, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 248
- [22] S. R. Wenham, S. J. Robinson, X. Dai, J. Zhao, A. Wang, Y. H. Tang, A. Ebong, C. B. Honsberg und M. A. Green, *Rear surface effects in high efficiency silicon solar cells*, Proc. 1st WCPEC, Hawaii 1994, S. 1278
- [23] A. Luque, A. Cuevas und J. M. Ruiz, *Double-sided n^+ - p - n^+ solar cell for bifacial concentration*, Solar Cells, **2**, 1980, S. 151
- [24] C. Z. Zhou, P. J. Verlinden, R. A. Crane und R. M. Swanson, *21.9% efficient silicon bifacial solar cells*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997, S. 287
- [25] S. Glunz, J. Knobloch, C. Hebling und W. Wettling, *The range of high-efficiency silicon solar cells fabricated at Fraunhofer ISE*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997, S. 231
- [26] C. Sah, R. N. Noyce und W. Shockley, *Carrier generation and recombination in pn -junctions and pn -junction characteristics*, Proc. IRE, **sept.**, 1957, S. 1228
- [27] C. B. Honsberg, S. B. Ghazati, A. U. Ebong, Y.-H. Tang und W. R. Wenham, *Elimination of parasitic effects in floating junction rear surface passivation for solar cells*, Proc. 25th IEEE PVSC, Washington 1996, S. 401
- [28] K. R. McIntosh, *The impact of rear illumination on bifacial solar cells with floating junction passivation*, Proc. 2nd WCPEC, Vienna 1998, S. 1515
- [29] H. Ohtsuka, M. Sakamoto, M. Koyama, K. Tsutsui, T. Uematsu und Y. Yazawa, *High efficiency bifacial silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1275
- [30] R. A. Sinton, P. J. Verlinden, R. A. Crane, R. M. Swanson, C. Tilford, J. Perkins und K. Garrison, *Large-area 21 % efficient Si solar cells*, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 157

- [31] P. J. Verlinden, R. M. Swanson, R. A. Sinton, R. A. Crane, C. Tilford, J. Perkins und K. Garrison, *High-efficiency, point-contact silicon solar cells for fresnel lens concentrator modules*, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 58
- [32] R. Sinton, Y. Kwark, J. Gan und R. Swanson, *27,5 % Si concentrator solar cells*, Electron Dev Letters, **7**, 1986, S. 567
- [33] R. R. King, R. Sinton und R. Swanson, *Front and back surface fields for point contact solar cells*, Proc. 20th IEEE PVSC, Las Vegas 1988, S. 538
- [34] A. Schönecker, T. Bruton, P. Fath, F. Ferrazza, S. Glunz, J. Nijs und O. Leistiko, *ACE designs project planning*, EU Commission, Brüssel, 1998
- [35] G. Willeke und P. Fath, *The POWER silicon solar cell concept*, Proc. 12th EPVSEC, Amsterdam 1994, S. 766
- [36] A. Luque und I. Tobias, *Perimeter recombination in planar solar cells*, J. Appl. Phys., **73**(8), 1993, S. 4042
- [37] K. R. McIntosh, *Solar Cell Cost Reductions using buried contact solar cell technology*, Proc. Solar 97, Austr. and NZ Solar Energy Society 1997, S. 111
- [38] J. Nijs, *Latest efficiency results with the screenprinting technology and comparison with the buried contact structure*, Proc. First WCPEC, Hawaii 1994, S. 1242
- [39] BP_Solar, *Our Technology*, London, 1998
- [40] J. E. Cotter, N. C. Shaw und M. F. Hossain, *Novel processes for simplified buried contact solar cells*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 303
- [41] W. Jooss, *Dissertation erscheint 2001*, Dissertation, Universität Konstanz, 2001
- [42] H. Knauss, *Diplomarbeit erscheint 2001*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2001
- [43] W. Jooss, H. Knauss, F. Huster, P. Fath und E. Bucher, *Back Contact buried contact silicon solar cells with metallization wrap around electrodes*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 176
- [44] E. v. Kerschaver, *A novel silicon solar cell structure with both external polarity contacts on the back surface*, Proc. 2nd WCPEC, Vienna 1998, S. 1479
- [45] E. v. Kerschaver, S. D. Wolf und J. Szlufcik, *Screen printed Metallisation Wrap Through solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1517
- [46] D. D. Smith, J. M. Gee, M. D. Bode und J. C. Jimeno, *Circuit modeling of the Emitter Wrap Through Solar Cell*, IEEE Trans Electr Dev, **46**(10), 1999, S. 1993
- [47] S. Hamamoto, H. Morikawa, H. Naomoto, Y. Kawama, A. Takami, S. Arimoto, T. Ishihara und K. Namba, *Development of the VEST Cell Process for Low Cost Fabrication*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1997, S. 2328
- [48] A. Schönecker, A. Weeber, W. Sinke, C. Zechner, A. Kress und P. Fath, *Attacking limiting factors in 10 x 10 cm² multicrystalline silicon, Emitter Wrap-Through solar cell design and processing*, Proc. 2nd WCPEC, Vienna 1998, S. 1677

-
- [49] S. Keller, *Neue Konzepte für monolithisch integrierte kristalline Siliziumsolarzellen*, Dissertation, Universität Konstanz, 2000
- [50] P. Fath, *Processing, characterization and simulation of mechanically textured crystalline silicon solar cells*, Dissertation, Universität Konstanz, 1998
- [51] G. Willeke und P. Fath, *Mechanical wafer engineering for semitransparent polycrystalline silicon solar cells*, Appl. Phys. Lett., **64**(10), 1994, S. 1274
- [52] C. Gerhards, A. Fischer, P. Fath und E. Bucher, *Mechanical microtexturization for multicrystalline Si solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1390
- [53] M. Wagner, *Steuerprogramm für Laser und Kreuztisch*, Konstanz, 1999
- [54] C. Zechner, *Mechanisch texturierte Solarzellen und Rückkontakt-Solarzellen aus kristallinem Silizium*, Dissertation, Universität Konstanz, 2000
- [55] R. Lüdemann, S. Schaefer und J. Reiß, *Dry solar cell processing for low-cost and high-efficiency concepts*, Proc. 2nd World PV conference, Vienna 1998, S. 1499
- [56] H. F. Winters, *Plasma assisted etching mechanisms: the implications of reaction probability and halogen coverage*, J. Vac. Sci. Technol., **B3**(5), 1985, S. 1376
- [57] R. Lüdemann, *Plasmatechnologie für die Photovoltaik*, Dissertation, Universität Konstanz, 1999
- [58] Technics, *Manual Plasmaätzer Technics 100*, München: Technics, 1980
- [59] D. S. Ruby, *Recent progress on the self-aligned selective emitter silicon solar cell*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim, California 1997, S. 39
- [60] D. S. Ruby, *Improved performance of self aligned selective emitter silicon solar cells*, Proc. 2nd WCPEC, Vienna 1998, S. 1461
- [61] D. S. Ruby, *Self-Aligned Selective emitter plasma etchback and passivation process for screen printed silicon solar cells*, <http://www.sandia.gov>
- [62] K. Faika, *Novel techniques to prevent edge isolation of silicon solar cells by avoiding leakage currents between the emitter and the aluminum rear contact*, Proc. 16th PVSEC, Glasgow 2000, S. 1173
- [63] K. Faika, *Lokale pn-Strukturen auf kristallinem Silizium*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2000
- [64] R. Kühn, *Herstellung, Charakterisierung und Simulation semitransparenter, bifacialer kristalliner Siliziumsolarzellen*, Dissertation, Universität Konstanz, 2001
- [65] J. Horzel, J. Slufcik, J. Nijs und R. Mertens, *A Simple processing sequence for selective emitters*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997, S. 139
- [66] L. Debarge, B. Forget, D. Fournier, L. Frisson und J. C. Muller, *Screen printable paste and spin on source applied to selective emitter formation in a single rapid thermal diffusion step*, Proc. PVSEC 16th, Glasgow 2000, S. 1504
- [67] J. Horzel, *Novel method to form selective emitters in one diffusion step without etching or masking*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1997, S. 61

- [68] C. Marckmann, *Herstellung und Charakterisierung von mechanisch strukturierten kristallinen Silizium Solarzellen*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 1996
- [69] E. v. Kerschaver, P. Choulat und J. Szlufcik, *Stable and reliable metallisation by application of electro-formed Ni stencils*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1528
- [70] C. Gerhards, *Persönliche Mitteilung*, 2001
- [71] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Diffusionstechnologie, Theorie der Diffusion*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 149
- [72] Veeco, *Manual Veeco 4-point probe*, München: Veeco, 1998
- [73] S. Sze, *VLSI technology*, New Yourk: McGraw-Hill Book Company, 1983
- [74] J. Horzel, J. Szlufzik und J. Nijs, *High efficiency industrial screen printed selective emitter solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1112
- [75] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Photostrom und Sättigungsstrom aus dem Emitter*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 106
- [76] F. Duerinckx, J. Slufcik, J. Nijs, r. Mertens, C. Gerhards, C. Marckmann, P. Fath und G. Willeke, *High efficiency, mechanically V-textured, screenprinted multicrystalline silicon solar cells with silicon nitride passivation*, Proc. 2nd WC PVSEC, Wien 1998, S. 1248
- [77] C. Zechner, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Numerical simulation studies of mechanically textured high efficiency silicon solar cells*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1997, S. 69
- [78] S. Schaefer, R. Preu, R. Lüdemann und S. W. Glunz, *Plasma etched PERC and buried base contact solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1443
- [79] S. Schaefer, H. Lautenschlager, G. Emanuel und R. Lüdemann, *Plasma etching and its effect on minority charge carrier lifetimes and crystalline silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1447
- [80] M. Schnell, R. Lüdemann und S. Schaefer, *Plasma surface texturization for multicrystalline silicon solar cells*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 367
- [81] E. Vazsonyi, K. D. Clercq, R. Einhaus, E. V. Kerschaver, K. Said, J. Poortmans, J. Szlufcik und J. Nijs, *Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells*, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **57**, 1999, S. 167
- [82] S. d. Wolf, P. Choulat, E. Vazsonyi, R. Einhaus, E. v. Kerschaver, K. D. Clercq und J. Szlufcik, *Towards industrial application of isotropic texturing for mc silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1517
- [83] A. Hauser, *private Mitteilung*, 2001
- [84] B. Vogl, A. Slade, C. Honsberg, J. Cotter und S. Wenham, *Inclusion of dielectric films for surface passivation of buried contact solar cells*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 327

-
- [85] S. Arimoto, M. Nakatani, Y. Nishimoto, H. Morikawa, M. Hayashi, H. Namizaki und K. Namba, *Simplified mass production process for 16 % efficiency multi-crystalline silicon solar cells*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S.
- [86] F. Duerinckx, A. Noppe, P. Choulat, J. Szlufcik, J. Nijs und B. Habraken, *Advanced industrial processes for large arear screen printed mc silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1301
- [87] B. Lenkeit, S. Steckemetz, A. Mücklinch, A. Metz und R. Hezel, *High quality screen printed and fired through silicon nitride rear contacts for bifacial silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1332
- [88] W. A. Lanford, *The hydrogen content of plasma-deposited silicon nitride*, J. Appl. Phys., **49**, 1978, S. 2473
- [89] A. Rohatgi, S. Narasimha und D. S. Ruby, *Effective pasivation of the low resistivity silicon surface by a rapid thermal oxide/PECVD silicon nitride stack and its application to passivated rear and bifacial Si solar cells*, Proc. 2nd WC PVSEC, Wien 1998, S. 2566
- [90] J. Schmidt, T. Lauinger, A. Aberle und R. Hezel, *Record low surface recombination velocities on low-resistivity silicon solar cell substrates*, Proc. 25th IEEE PVSC, Washington 1996, S. 413
- [91] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Antireflexion mittels dünner Schichten*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 125
- [92] A. Hauser, *SEM Bild freundlicherweise zur Verfügung gestellt: Mikropyramiden durch alkalische Texturierung*, SEM Bild, 2001
- [93] C. Gerhards, *SEM Bild freundlicherweise zur Verfügung gestellt*, 1998
- [94] A. Götzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Temperatur*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 200
- [95] A. Goetzberger, *Zweidiodenmodell*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1984, S. 88
- [96] B. Fischer, P. Fath und E. Bucher, *Evaluation of solar cell J(V)-Measurements with a distributed series resistance model*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1365
- [97] M. Stocks und D. Macdonald, *Non-ideal resistive effects in silicon solar cells*, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow 2000, S. 1671
- [98] A. G. Aberle, S. R. Wenham und M. A. Green, *A new method for accurate measurements of the lumped seris resistance of solar cells*, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 133
- [99] B. Fischer, *Program for the Evaluation of IV-Characteristics of Solar Cells*, Konstanz, 1999
- [100] J. Dicker, J. Sölter, J. O. Schumacher, S. W. Glunz und W. Warta, *Analysis of rear contacted solar cell structures for cost-effective processes and materials*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 387

- [101] R. Brendel und U. Rau, *Effective diffusion lengths for minority carriers in solar cells as determined from internal quantum efficiency analysis*, Journal of applied physics, **85**(7), 1999, S. 3634
- [102] B. Fischer, *Programm zur SR-Auswertung*, Konstanz, 2000
- [103] P. A. Basore, *Extended spectral analysis of internal quantum efficiency*, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville 1993, S. 147
- [104] S. Keller, M. Spiegel, P. Fath, G. P. Willeke und E. Bucher, *A critical evaluation of the effective diffusion length determination in crystalline silicon solar cells from an extended spectral analysis*, IEEE Transactions on electron devices, **45**(7), 1998, S. 159
- [105] M. Spiegel, B. Fischer, S. Keller und E. Bucher, *Separation of bulk diffusion length & back surface recombination velocity by improved IQE-analysis*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 311
- [106] J. M. Gee, *A simple procedure to analyze rear surface internal quantum efficiency*, Proc. 25th IEEE PVSC, Washington 1996, S. 557
- [107] S. Keller, *Optoelektronische Charakterisierung von kristallinen Silizium Solarzellen*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 1997
- [108] T. Pernau, *Lebensdauerbestimmung und orts aufgelöste Messung der Quantenausbeute an kristallinem Silizium*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 1999
- [109] M. Rinio und H. J. Möller, *LBIC Analysis of Solar Cells, Reflection mapping of surfaces*, Institute for Experimental physics, Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany, 1998
- [110] M. Langenkamp, O. Breitenstein, M. E. Nell, A. Braun, H.-G. Wagemann und L. Elstner, *Microscopic localisation and analysis of leakage currents in thin film silicon solar cells*, Proc. PVSEC 16th, Glasgow 2000, S. 1643
- [111] M. Langenkamp und O. Breitenstein, *Fast shunt hunting in solar cells with highly sensitive lock in IR thermography*, Proc. 9th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes, Breckenridge Col USA 1999, S. 198
- [112] O. Breitenstein und M. Langenkamp, *Quantitative local analysis of IV-characteristics of solar cells by thermal methods*, Proc. 2nd WPVSEC, Vienna 1998, S. 1382
- [113] M. Langenkamp und O. Breitenstein, *Influence of the lock-in frequency on shunt measurements in solar cells using contact thermography*, Proc. 2nd WCEPSEC, Vienna 1998, S. 1378
- [114] A. Kaminski, M. Langenkamp und O. Breitenstein, *Shunt detection by infrared thermography and dynamic precision contact thermography*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1997, S. 830
- [115] B. Terheiden, P. Fath und E. Bucher, *The MECOR (Mechanically corrugated) silicon solar cell concept*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 399
- [116] S. Glunz, *Persönliche Mitteilung*, 2000

-
- [117] M. Spiegel, *Microwave induced remote hydrogen plasma (MIRHP) passivation of multicrystalline silicon solar cells*, Dissertation, Universität Konstanz, 1998
- [118] G. Hahn, *RGS-Silizium, Materialanalyse und Solarzellenprozessierung*, Dissertation, Universität Konstanz, 1999
- [119] W. Neu, *Dieser Prozeß wurde zum Teil von W. Neu durchgeführt*, 2001
- [120] T. Pernau, *LBIC Auswertprogramm*, Konstanz, 2000
- [121] J. M. Gee, D. D. Smith, S. Garrett, M. Bode und J. Jimeno, *Back-Contact Crystalline Silicon solar cells and modules*, Proc. NCPV Program Review Meeting, Denver 1998, S. 1
- [122] A. Hübner, A. Aberle und R. Hezel, *Cost-effective bifacial silicon solar cells with 19% front and 18% rear efficiency*, Proc. 25th IEEE PVSC, Washington 1996, S. 489
- [123] E. V. Kerschaver, C. Zechner und J. Dicker, *Double Sided Minority Carrier Collection in Silicon Solar Cells*, IEEE Transactions on Electron Devices, **47**(4), 2000, S. 711
- [124] J. J. Ebers und J. M. Moll, *Ebers Moll Modell*, Proc. of the IRE, **40**, 1954, S. 1761
- [125] UNSW, *PC1D, Simulationsprogramm für Solarzellen*, Sydney, 1997
- [126] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Abb. 6.9 Sättigungsstrom eines Emitters als Funktion der Oberflächenkonzentration N_s mit S_p als Parameter*, in *Sonnenenergie Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 108
- [127] B. Fischer, *Persönliche Mitteilung*, 2001
- [128] R. Kühn, A. Boueke, M. Wibral, C. Zechner, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Investigations of the effect of pn junctions bordering on the surface of silicon solar cells*, Proc. 2nd WPSEC, Vienna 1998, S. 1390
- [129] ISE_AG, *Programmpaket Halbleitersimulationen DESSIS_{ISE}*, Zürich, 1998
- [130] R. Kühn, A. Boueke, A. Kress, P. Fath, G. P. Willeke und E. Bucher, *Characterization of Novel Mono- and Bifacially Active Semi-Transparent Crystalline Silicon Solar Cells*, IEEE Transactions on Electron Devices, **46**(10), 1999, S. 2013
- [131] F. Huster, *Fingerwiderstände bei EWT Zellen*, Konstanz, 2000
- [132] F. Artuso, M. Vancini, G. Arabito, U. Besi-Vetrella und L. Pirozzi, *Study of ohmic contacts to crystalline silicon solar cells made by electroless plating and screen printing deposition*, Proc. 14th EPVSEC, Barcelona 1997, S. 834
- [133] U. Besi-Vetrella, L. Pirozzi, E. Salza, G. Ginocciotti, F. Ferrazza, L. Ventura, A. Slaoui und J. C. Muller, *Large area, screen printed silicon solar cells with selective emitter made by laser overdoping and RTA spin-on glasses*, Proc. 26th IEEE PVSC, Anaheim 1997, S. 135
- [134] D. Meier, H. Davis, R. Garcia, J. Jessup und A. Carroli, *Self-doping contacts to silicon using silver coated with a dopant source*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 69

- [135] R. Murrmann und D. Widmann, *Current-crowding on metal contacts to planar devices*, IEEE Trans Elec Dev, **16**, 1969, S. 1022
- [136] O. Breitenstein, *Thermografiebild einer EWT Zelle zwecks Shuntlokalisierung*, Thermografiebild, 1999
- [137] S. Glunz und W. Warta, *LBIC Aufnahme einer EWT Zelle*, LBIC Bild, 1999
- [138] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch, *Einfluß der Basisdotierung*, in *Sonnenenergie: Photovoltaik*, Teubner: Stuttgart, 1994, S. 111
- [139] W. Jooss, *Getterstudien an multikristallinem Silizium für Solarzellen*, Diplomarbeit, Universität Konstanz, 1998
- [140] A. B. Sproul, *General Solution of the Equation describing the effect of surface recombination on carrier decay in semiconductors*, J. Appl. Phys., **76**, 1994, S. 2851
- [141] J. d. Moschner, P. Doshi, D. S. Ruby, T. Lauinger, A. G. Aberle und A. Rohatgi, *Comparison of front and back surface passivation schemes for silicon solar cells*, Proc. 2nd WCPEC, Vienna 1998, S. 1894
- [142] S. W. Glunz, R. Preu, S. Schaefer, E. Schneiderlöchner, W. Pfeging, R. Lüdemann und G. Willeke, *New simplified methods for patterning the rear contact of RP-PERC high efficiency solar cells*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 171
- [143] A. Hauser, *Transmissionskurve von Glas, freundlicherweise zur Verfügung gestellt*, 2001
- [144] H. Nagel, A. Metz, A. G. Aberle und R. Hezel, *Photovoltaic module with enhanced optical performance*, Proc. 2nd WCPSEC, Vienna 1998, S. 2400
- [145] A. Boueke, *Entwicklung und Charakterisierung semitransparenter kristalliner Siliziumsolarzellen*, Dissertation, Universität Konstanz, 2000
- [146] ISE, *Manual zu "Dessis-Simulationspaket"*, ISE AG, Zürich, 1998
- [147] A. Sproul, *Dimensionless solution of the equation describing the effect of surface recombination on carrier decay in semiconductors*, J. Appl. Phys, **76**(5), 1994, S. 2851

Publikationen

Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften:

A. Kress, R. Kühn, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Low-Cost Back Contact Silicon Solar Cells*, IEEE Transactions on Electron devices, **46**(10), 1999, S. 2000

R. Kühn, A. Boueke, A. Kress, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Characterization of Novel Mono- and Bifacially Active Semi-Transparent Crystalline Silicon Solar Cells*, IEEE Transactions on Electron Devices, **46**(10), 1999, S. 2013

A. Kress, O. Breitenstein, S. Glunz, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Investigations on low-cost back-contact silicon solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells, **65**, 2001, S555

W. Neu, A. Kress, W. Jooss, P. Fath, E. Bucher, *Low-cost multi-crystalline back contact silicon solar cells with screen printed metallisation*, Solar Energy Materials & Solar Cells, to be published

Konferenzbeiträge:

A. Schönecker, A. Weeber, W. Sinke, C. Zechner, A. Kress und P. Fath, *Attacking limiting factors in $10 \times 10 \text{ cm}^2$ multicrystalline silicon, Emitter Wrap-Through solar cell design and processing*, Proc. 2nd WCPSEC, Vienna 1998, S. 1677

A. Kress, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Low-cost back contact silicon solar cells applying the Emitter Wrap-Through (EWT) concept*, Proc. 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna 1998, S. 1547

A. Kress, P. Fath, G. Willeke und E. Bucher, *Low Cost Back Contact Silicon Solar Cells*, Proc. PVSEC 11th, Sapporo, Japan 1999, S. 919

S. Keller, M. Wagner, S. Scheibenstock, W. Jooß, A. Kress, G. Hahn, P. Fath und E. Bucher, *Simple minimodule fabrication schemes for high voltage silicon solar cells*, Proc. PVSEC 16th, Glasgow 2000, S. 1218

A. Kress, R. Tölle, T. Bruton, P. Fath und E. Bucher, *$10 \times 10 \text{ cm}^2$ screen printed back contact cell with a selective emitter*, Proc. 28th IEEE PVSC, Anchorage 2000, S. 213

A. Kress, T. Pernau, P. Fath und E. Bucher, *LBIC measurements on low cost back contact solar cells*, Proc. 16th EPSEC, Glasgow 2000, S. 1362

A. Kress, P. Fath und E. Bucher, *Recent results in low cost back contact solar cells*, Proc. 16th EPSEC, Glasgow 2000, S. 1359

Vorträge auf internationalen Konferenzen:

„*Low Cost Back Contact Silicon Solar Cells*“, 11th PVSEC, Sapporo, September 1999

„*10 x 10 cm² screen printed back contact cell with a selective emitter*“, 28th IEEE PVSC, Anchorage, September 2000

Patentanmeldung:

A. Kress, P. Fath: „Verfahren zur Herstellung einer Solarzelle und nach diesem Verfahren hergestellte Solarzelle“, Aktenzeichen DE 100 47 556.6, Anmeldedatum 22.09.2000

Dank

Bedanken möchte ich mich bei allen, die zu dieser Arbeit beigetragen haben:

- Bei meinem Doktorvater Prof. Dr. E. Bucher für die Aufnahme an seinem Lehrstuhl und für den Freiraum, den er seinen Mitarbeitern gewährt.
- Bei Prof. Dr. Wettling für die kurzentschlossene Übernahme der Zweitkorrektur.
- Bei Dr. Peter Fath, der mit seinem unerschütterlichen Optimismus auch das Unmögliche möglich werden läßt und der sich bis an die Belastungsgrenze für die Arbeitsgruppe engagiert.
- Bei allen Kollegen und Mitarbeitern, speziell Frank Huster, Bernhard Fischer, Patrick Geiger, Andreas Schneider und Thomas Pernau, die neben ihrer eigenen Promotion auch noch ständig alle Geräte und Computer reparieren und in Gang halten müssen, sowie Manfred Keil, der für die Infrastruktur sorgt und immer mit Rat und Tat zur Seite steht.
- Bei Dr. Steffen Keller und Marco Wagner für den Aufbau und das Steuerprogramm des Lasers.
- Bei Rainer Tölle und BP Solar für die teilprozessierten Wafer.
- Bei Barbara Terheiden, Wolfgang Jooß und Dr. Giso Hahn für viele konstruktive Anregungen und Ratschläge beim Korrekturlesen.
- Bei Wolfgang Neu dafür, daß er den Beitrag zur Korea-Konferenz so bereitwillig übernommen hat.
- Bei Said Riazi-Nehad ganz mächtig dafür, daß es mit dem Ausdrucken tatsächlich geklappt hat.
- Bei Frau Schellinger für die nette Atmosphäre.
- Nochmal bei allen dafür, daß es so angenehm war, die letzten 4 Jahre in Konstanz zu verbringen.
- Bei Jochen für die Laufrunden im Mainauwald.
- Bei Giso, Detlef, Jochen und Thilo für den Spaß beim Volleyball.
- Bei meinen Eltern, die mir das Studium finanzierten und meinen Großeltern, die mich immer moralisch unterstützen.

Diese Arbeit wurden teilweise durch Mittel des ACE Designs Projekt (JOR3-CT98-0269) der Europäischen Union finanziert.

