

# **Plasmachemisches Trockenätzen von Solarwafern mit Atmosphärendruck-Plasmen**

Von  
Der Fakultät Maschinenwesen der  
Technischen Universität Dresden  
genehmigte

## **Dissertation**

Zur Erlangung des  
Akademischen Grades  
Doktor des Ingenieurwissenschaften

vorgelegt  
von

**Dipl. Ing. Elena López Alonso, geb. am 18.01.1979**

Tag der Einreichung: 27.02.2014

Tag der Verteidigung: 08.10.2014

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Beyer, TU Dresden
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens, TU Dresden



Berichte aus der Fertigungstechnik

**Elena López Alonso**

**Plasmachemisches Trockenätzen von Solarwafern  
mit Atmosphärendruck-Plasmen**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3217-8

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhalt

<b>Inhalt</b> .....	<b>3</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Grundlagen der Solarenergietechnik</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Theoretische Beschreibung einer Solarzelle</b> .....	<b>15</b>
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise der Silizium-Solarzelle .....	16
2.1.2 Strom-Spannungs-Kennlinie und wichtigste Kenngrößen der Solarzelle .....	17
<b>2.2 Verlustmechanismen</b> .....	<b>19</b>
2.2.1 Optische Verluste .....	20
2.2.1.1 Antireflexbeschichtung .....	20
2.2.1.2 Oberflächentexturierung.....	21
2.2.1.3 Verbesserung des Lichteinfanges .....	22
2.2.2 Elektrische Verluste .....	23
2.2.2.1 Verluste durch Rekombination .....	23
2.2.2.2 Ohmsche Verluste.....	27
<b>2.3 Einteilung der Solarzellen</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4 Herstellung von kristallinen Siliziumsolarellen</b> .....	<b>29</b>
2.4.1 Waferherstellung .....	29
2.4.2 Industrielle Herstellungsverfahren und Aufbau einer Standardsolarzelle .....	30
2.4.3 Innovative Herstellungsverfahren mit Atmosphärendruck-Plasma-Prozessen .....	32
<b>3 Plasmagestützte Silizium-Ätzverfahren</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1 Niederdruckplasmen</b> .....	<b>36</b>
3.1.1 Sputterätzen .....	37
3.1.2 Ionenstrahlätzen .....	39
3.1.3 Reaktives Ionenätzen (Hochfrequenz-Anregung) .....	39
3.1.4 Mikrowellenentladungen.....	40
<b>3.2 Atmosphärendruckplasmen</b> .....	<b>42</b>
3.2.1 Atmospheric Downstream Plasma (ADP) der Firma Tru-Si.....	43
3.2.2 CYRANNUS Mikrowellenplasmaquelle.....	44
3.2.3 LARGE Lichtbogenplasmaquelle .....	45
<b>4 Plasmachemie</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1 Auswahl geeigneter Ätzchemikalien</b> .....	<b>47</b>
<b>4.2 Ätzmechanismus</b> .....	<b>49</b>
4.2.1 Ätzprofile.....	50
<b>4.3 Chemische Reaktionen</b> .....	<b>51</b>
<b>4.4 Eingesetzte Ätzgase</b> .....	<b>53</b>
4.4.1 Schwefelhexafluorid $\text{SF}_6$ .....	53
4.4.2 Stickstofftrifluorid $\text{NF}_3$ .....	54
4.4.3 Carbonylfluorid $\text{COF}_2$ .....	54
4.4.4 Tetrafluormethan $\text{CF}_4$ und $\text{C}_x\text{F}_y$ -Gase .....	54
4.4.5 Chlorwasserstoff $\text{HCl}$ .....	55
4.4.6 Zugabe von weiteren Reaktivgasen .....	55
4.4.6.1 Sauerstoff .....	55
4.4.6.2 Wasserstoff .....	56
4.4.6.3 Stickstoff und Gasgemische .....	57
<b>4.5 Umweltaspekte der verschiedenen Ätzgase</b> .....	<b>57</b>

<b>5 Experimenteller Aufbau.....</b>	<b>59</b>
5.1 Aufbau der PECVD-Laboranlage .....	59
5.2 Aufbau der Durchlaufanlage zum plasmachemischen Ätzen .....	61
<b>6 Charakterisierungsmethoden.....</b>	<b>63</b>
6.1 Rasterelektronenmikroskopie.....	63
6.2 Atomkraftmikroskop.....	63
6.3 Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie .....	64
6.4 Reflexions-/Transmissions-Spektroskopie.....	65
6.5 Mikrowellendetektierte Photoleitfähigkeit.....	65
6.6 Gasphasen-FTIR-Spektroskopie.....	66
6.7 Optische Emissionsspektroskopie .....	67
<b>7 Grundlegende Untersuchungen zum plasmachemischen Ätzen von Silizium mit halogenhaltigen Gasen bei Atmosphärendruck .....</b>	<b>69</b>
7.1 Einfluss des Ätzgases auf die Ätzrate .....	69
7.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Ätzrate.....	71
7.3 Einfluss der Substrattemperatur .....	74
7.4 Einfluss der Reaktorgeometrie auf die Ätzrate .....	75
7.5 Einfluss der Plasmaquellengeometrie auf die Ätzrate .....	76
7.6 Homogenität der dynamischen Ätzrate .....	79
7.7 Abhängigkeit der Ätzrate von der Si-Kristallorientierung .....	80
7.8 Einfluss des Ätzprozesses auf die Ladungsträgerlebensdauer im Silizium .....	81
7.9 Zusammenfassung .....	83
<b>8 Ätzen der Waferrückseiten zur Kantenisolation.....</b>	<b>85</b>
8.1 Motivation.....	85
8.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Qualität der Kantenisolation .....	86
8.2.1 Untersuchung des Kantenisoliationsprozesses in der PECVD-Anlage.....	86
8.2.2 Optimierung des Substratträgers der PECVD-Anlage .....	90
8.3 AP-Plasma-Kantenisolation im Vergleich zu anderen Technologien .....	94
8.3.1 Vergleich mit mechanischem Trennen .....	95
8.3.2 Vergleich mit Niederdruck-Plasmaätzen .....	95
8.3.3 Vergleich mit Laserkantenisolation .....	97
8.3.4 Vergleich mit nasschemischem Ätzen .....	98
8.4 Einfluss des Ätzprozesses auf die Ladungsträgerlebensdauer.....	101
8.5 Zusammenfassung .....	103
<b>9 Plasmachemisches Glätten der texturierten Waferrückseite.....</b>	<b>105</b>
9.1 Motivation.....	105
9.2 Auswahl der Ätzchemie .....	105
9.2.1 Stickstofftrifluorid $\text{NF}_3$ .....	106
9.2.2 Schwefelhexafluorid $\text{SF}_6$ .....	108
9.2.3 Schwefelhexafluorid-Sauerstoff-Mischung .....	110
9.3 Einfluss des Verhältnisses von $\text{SF}_6$ und $\text{O}_2$ im Ätzgasgemisch auf die Oberflächenmorphologie .....	111
9.4 Prozessevaluierung an Solarzellen.....	115
9.4.1 Standard-Solarzellen.....	115
9.4.2 PERC-Solarzellen mit selektivem Emitter.....	118
9.5 Messungen der Minoritäts-Ladungsträgerlebensdauer .....	121
9.6 Zusammenfassung .....	122
<b>10 Prozesscharakterisierung.....</b>	<b>125</b>
10.1 Motivation.....	125
10.2 FTIR-Spektroskopie der Gasphase .....	125

10.2.1 Zusammensetzung der Gasphase .....	125
10.2.2 Aktivierungsgrad und Gasausnutzung für das Ätzen.....	127
10.2.3 Kontinuierliche spektroskopische Bestimmung der Ätzrate.....	133
10.2.4 Einfluss der verwendeten Ätzgase auf die Umwelt.....	134
<b>10.3 Optische Emissionsspektroskopie .....</b>	<b>135</b>
10.3.1 Untersuchung des Ar/N <sub>2</sub> -Plasmas und Zugabe von SF <sub>6</sub> und HCl .....	136
10.3.2 Zugabe von COF <sub>2</sub> und COF <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> in Ar-N <sub>2</sub> -Plasmen.....	138
<b>10.4 Zusammenfassung .....</b>	<b>143</b>
<b>11 Zusammenfassung.....</b>	<b>145</b>
<b>12 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>
<b>13 Veröffentlichungen und Patente .....</b>	<b>161</b>
<b>14 Danksagung .....</b>	<b>163</b>
<b>15 Selbständigkeitserklärung.....</b>	<b>165</b>
<b>16 Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>167</b>
<b>18 Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>173</b>