



# Betrachtung der Kristallinitätsentwicklung in mikrokristallinem Dünnschicht-Silizium mit in-situ Raman-Spektroskopie

Thomas Fink

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 405

ISBN 978-3-95806-289-4

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
IEK-5 Photovoltaik

# **Betrachtung der Kristallinitätsentwicklung in mikrokristallinem Dünnschicht-Silizium mit in-situ Raman-Spektroskopie**

Thomas Fink

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 405

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-289-4

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen und experimentelle Methoden</b> .....	<b>5</b>
2.1 Silizium-Dünnschichtsolarzellen .....	5
2.1.1 Funktionsweise und Kenngrößen von Dünnschichtsolarzellen .....	5
2.1.2 Hydrogeneriertes amorphes und mikrokristallines Silizium .....	9
2.1.3 Lichteinfang in Dünnschichtsolarzellen.....	13
2.2 Charakterisierungsmethoden .....	15
2.2.1 Rasterkraftmikroskopie .....	15
2.2.2 Rasterelektronenmikroskopie .....	19
2.2.3 Raman-Spektroskopie .....	19
2.2.4 Solarzellenkontaktierung und Aufnahme von Solarzellen-Kennlinien .....	22
2.2.5 Externe Quanteneffizienz .....	23
2.3 Herstellung von hydrogeneriertem mikrokristallinem Silizium .....	24
2.3.1 Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD).....	25
2.3.2 Konfiguration der PECVD-Reaktoren .....	27
2.3.3 Prozesseinstellungen und Depositionsbedingungen.....	28
2.4 In-situ Raman-Spektroskopie .....	30
<b>3 Optimierung des in-situ Raman-Aufbaus und der Datenanalyse</b> .....	<b>35</b>
3.1 Modifikationen des optischen Zugriffs im PECVD-Reaktor .....	35
3.1.1 Linsenmaterial.....	36
3.1.2 Beschichtungsschutz für die Linse .....	37
3.1.3 Beschichtungsreduktion des Quarzplättchens .....	39
3.2 Signalanalyse bei geringen Silizium-Schichtdicken .....	43
3.2.1 Ex-situ Charakterisierung der anfänglichen Wachstumsphase.....	44
3.2.2 Auswirkungen der Lasereindringtiefe auf die Bestimmung der Raman-Kristallinität.....	45
3.2.3 Bestimmung des Substratuntergrunds .....	48
3.2.4 Zeitliche Entwicklung der Signalbeiträge .....	51
3.2.5 Zusammenfassung .....	54

3.3	Konfidenzintervalle der Kristallinitätsprofile .....	56
3.4	Zusammenfassung .....	59
<b>4</b>	<b>Auswirkungen kontrolliert abgeschiedener Absorberschichten auf die Solarzelleneigenschaften .....</b>	<b>61</b>
4.1	Entwicklung der Raman-Kristallinität bei konstanten Prozesseinstellungen .....	62
4.1.1	Optimales Kristallinitätsprofil bei konstanten Prozesseinstellungen .....	62
4.1.2	Reproduzierbarkeit von Absorberschichten .....	65
4.1.3	Prozesskontrolle .....	66
4.2	Auswirkungen einer modifizierten Raman-Kristallinität während der anfänglichen Wachstumsphase .....	69
4.2.1	Bestimmung der Wachstumsrate bei unterschiedlicher Silankonzentration .....	69
4.2.2	Optimierung der anfänglichen Wachstumsphase .....	70
4.2.3	Einfluss der anfänglichen Wachstumsphase auf die externe Quanteneffizienz .....	73
4.2.4	Einfluss eines Wasserstoffplasmas auf die p-dotierten Schichten und Auswirkungen auf die Solarzelleneigenschaften .....	75
4.3	Auswirkungen einer modifizierten Raman-Kristallinität während des späteren Schichtwachstums .....	78
4.4	Zusammenfassung .....	81
<b>5</b>	<b>Wachstumskontrolle für mikrokristallines Silizium auf unterschiedlich texturierten Substratoberflächen .....</b>	<b>83</b>
5.1	Entwicklung der Raman-Kristallinität auf unterschiedlich texturierten Substratoberflächen .....	84
5.1.1	Schichtwachstum auf breiten, kraterartigen Strukturen .....	84
5.1.2	Schichtwachstum auf schmalen, kraterartigen Strukturen .....	89
5.1.3	Schichtwachstum auf periodischen Imprint-Strukturen .....	92
5.1.4	Zusammenfassung .....	96
5.2	Korrelation zwischen der Oberflächengeometrie und der Entwicklung der Raman-Kristallinität .....	98
5.2.1	Bestimmung und Entwicklung der Oberflächenwinkelverteilung .....	98
5.2.2	In-situ Charakterisierung der Oberflächenwinkelverteilung .....	102
5.2.3	Korrelation zwischen der Raman-Kristallinität und der Oberflächenwinkelverteilung .....	104
5.2.4	Diskussion zur Kristallisierung von mikrokristallinem Silizium auf rauen Substratoberflächen .....	106
5.2.5	Zusammenfassung .....	109
5.3	Prozesskontrolle für das Wachstum von Absorberschichten mit konstantem Kristallinitätsprofil auf breiten kraterartigen Strukturen .....	110
5.3.1	Mikrokristallines Schichtwachstum auf breiten kraterartigen Substratoberflächen bei konstanten Prozesseinstellungen .....	110

5.3.2	Kontrollierte Siliziumabscheidung auf breiten kraterartigen Strukturen.....	114
5.3.3	Elektrische und optische Charakterisierung von Solarzellen mit kontrolliert abgeschiedenen Absorberschichten auf breiten kraterartigen Substrattexturen .....	117
5.3.4	Zusammenfassung .....	122
5.4	Kompensation morphologiebedingter Wachstumsdrifte auf schmalen kraterartigen Strukturen .	123
5.4.1	Mikrokristallines Schichtwachstum auf schmalen kraterartigen Substratoberflächen bei identischen Prozesseinstellungen .....	124
5.4.2	Anpassung der Prozesseinstellungen für die Siliziumabscheidung auf schmalen kraterartigen Strukturen .....	126
5.4.3	Charakterisierung von Solarzellen mit deckungsgleichen Kristallinitätsprofilen auf schmalen kraterartigen Substrattexturen.....	127
5.4.4	Zusammenfassung .....	131
5.5	Zusammenfassung .....	132
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>141</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>165</b>

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 405  
ISBN 978-3-95806-289-4