

Heißdraht-CVD von Siliziumschichten - Untersuchungen zur Stabilisierung des Abscheideprozesses

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Artur Laukart
aus (Geburtsort): Syktywkar, ehem. UDSSR
eingereicht am: 07.12.2012
mündliche Prüfung am: 07.02.2013

Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Claus-Peter Klages
Prof. Dr. rer. nat. Joachim Rösler

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Grundlagen	4
2.1	Amorphes Dünnschichtsilizium in der Photovoltaik	4
2.1.1	Kurze Historie von amorphem Dünnschichtsilizium in der Photovoltaik	4
2.1.2	Wichtige Eigenschaften von amorphem Silizium	5
2.1.3	Zelltypen	8
2.2	Abscheidungsverfahren für Dünnschichtsilizium	12
2.3	Das Heißdraht-CVD Verfahren	13
2.3.1	Kurze Historie mit Schwerpunkt Siliziumschichten	13
2.3.2	Physikalische Chemie der Siliziumabscheidung	14
2.3.3	Vergleich von HWCVD und PECVD	17
2.4	Silizidbildung im Heißdraht-CVD-Prozess	18
2.5	Maßnahmen gegen die Silizidbildung	20
3	Geräte und Methoden	21
3.1	Statistische Versuchsplanung	21
3.2	Beschichtungsanlage Inline-HWCVD	24
3.2.1	Versuchspläne zur Schichtentwicklung	25
3.3	Beschichtungsanlage CVD-XL	26
3.3.1	Untersuchung der Silizidbildung	27
3.3.2	Analytisches Modell für das Silizidwachstum in den Draht	28
3.3.3	Unterdrückung der Silizidbildung durch Kanäle	31
3.3.4	Bestimmung der Siliziumschichtdicke auf Kanalwänden	32
3.3.5	Analytisches Modell für den Silanverbrauch im Kanal	33
3.3.6	Unterdrückung der Silizidbildung durch Drahtbewegung	38
3.4	In-Situ-Pyrometrie	39
3.4.1	Zusammenhang von elektrischer Leistung und Draht- temperatur	40
3.4.2	Bestimmung der normierten Emissivität	41
3.5	In-Situ-Massenspektrometrie	42
3.5.1	Bestimmung des Silanumsatzes	42
3.5.2	Bestimmung des Wasserstoffgehalts in der Gasphase	43
3.5.3	Analytisches Modell für den Silanumsatz	43
3.6	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie	45

3.6.1	Der Mikrostrukturfaktor R^*	47
3.6.2	Bestimmung des Absorptionskoeffizienten	47
3.6.3	Bestimmung des Wasserstoffgehalts	48
3.7	Messung des Quotienten aus Hell- und Dunkelleitfähigkeit	49
3.8	Herstellung und Charakterisierung von Solarzellen	50
3.9	Weitere Analytik und Methoden	53
4	Schichtentwicklung	54
4.1	Silanumsatz und Silanpartialdruck	54
4.2	Beschichtungsrate	60
4.3	Wasserstoffgehalt	62
4.4	Mikrostrukturfaktor R^*	65
4.5	Quotient aus Hell- und Dunkelleitfähigkeit	69
4.6	p-i-n Dünnschichtsolarzellen	71
4.7	Zusammenfassende Diskussion	72
5	Untersuchungen zur Silizidbildung	75
5.1	Silizidbildung an der Einspannstelle	75
5.2	Thermodynamik der Silizidbildung	78
5.2.1	Entstehung und Grenzen der Silizidzonen	78
5.2.2	Experimentelle Stabilitätstemperatur der Wolframsilizide	82
5.3	Abhängigkeit der Silizidbildung von Prozessparametern	85
5.3.1	Dicke der Silizidschicht	86
5.3.2	Geschwindigkeit der Silizidbildung	91
5.3.3	Ausbildung der Silizidzonen	92
5.3.4	Einfluss der Drahttemperatur auf die Silizidbildung	95
5.4	Auswirkung der Silizidbildung auf den Prozess	97
5.4.1	Emissivität: Effekt der Drahttemperatur	99
5.4.2	Emissivität: Effekte anderer Prozessparameter	99
5.5	Effizienz der Silizidbildung	101
5.6	Zusammenfassende Diskussion	102
6	Unterdrückung der Silizidbildung	104
6.1	Durch einen Kanal geschützte Einspannung	104
6.1.1	Langzeitbeschichtung mit Kanal	104
6.1.2	Beschichtungsrate im Kanal	110
6.1.3	Bestimmung kritischer Parameter	111
6.1.4	Bewertung des Modells	113

6.2	Bewegte Kontaktierung	116
6.3	Zusammenfassende Diskussion	121
7	Fazit und Ausblick	124
A	Anhang	128
A.1	Symbole und Abkürzungen	128
A.2	Konstanten und Stoffdaten	132
A.3	Rechnung zur Drahttemperatur	133
A.4	Experimentelle Daten	135
A.5	Versuchspläne	144
	Literatur	172