

# Abkürzungen und Symbole

## Symbole

Tabelle B.2: Verwendete Symbole und Einheiten

---

$A$	–	Diodenqualitätsfaktor
$A_{1,2}$	[eV]	Absorptionskanten der QE-Spektren
$\alpha(\lambda)$	[m <sup>-1</sup> ]	Absorptionskoeffizient
$\beta$	[°]	Öffnungswinkel der Cantileverspitze
$C$	[F]	Kapazität zwischen Cantilever und Probe
$C_H$	[Nm]	Hamaker-Konstante
$\Delta\omega$	[Hz]	Frequenzverschiebung im noncontact-AFM
$e$	[As]	Elementarladung, $e = 1.602189 \times 10^{-19}$ As
$\vec{E}$	[V/m]	Elektrische Feldstärke
$E_{00}$	[eV]	Charakteristische Tunnelenergie
$E_a$	[eV]	Aktivierungsenergie
$E_B$	[eV]	Grenzflächenbarriere
$E_{bind}$	[eV]	Bindungsenergie
$E_C$	[eV]	Lage des Leitungsbandminimums
$\Delta E_C$	[eV]	Leitungsbanddiskontinuität
$E_F$	[eV]	Lage des Fermi-Niveaus
$E_{F,p}, E_{F,n}$	[eV]	Lage der Quasi-Fermi-Niveaus im p- bzw. n-Halbleiter
$E_g$	[eV]	Energie der Bandlücke
$E_{kin}$	[eV]	Kinetische Energie
$E_\ell$	[eV]	Lage des lokalen Vakuumniveaus
$E_{photon}$	[eV]	Photonenenergie
$E_V$	[eV]	Lage des Valenzbandmaximums
$\Delta E_V$	[eV]	Valenzbanddiskontinuität
$E_{Vac}$	[eV]	Lage des Vakuumniveaus

---

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

$\epsilon_0$	[As/Vm]	Dielektrizitätskonstante, $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ As/Vm
$\epsilon_{p,n}$	–	relative Dielektrizitätskonstanten des p- bzw. n-Halbleiters
$\epsilon_S$	[As/Vm]	Dielektrizitätskonstante des Halbleiters
$\eta$	[%]	Wirkungsgrad
$F$	[N]	Kraft zwischen Cantileverspitze und Probe
$F_{es}$	[N]	Elektrostatistischer Beitrag zur Kraft $F$
$FF$	–	Füllfaktor
$F_N$	[N]	Normalkraft zwischen Cantileverspitze und Probe
$F_{vdW}$	[N]	Van der Waals Beitrag zur Kraft $F$
$I(t)$	[A]	Verschiebungsstrom
$I_B$	[mW/cm <sup>2</sup> ]	Beleuchtungsintensität
$J$	[A/m <sup>2</sup> ]	Stromdichte
$J_0$	[A/m <sup>2</sup> ]	Sperrsättigungsstromdichte
$J_{ph}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Photostromdichte
$J_{SC}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Kurzschlussstromdichte
$k$	[N/m]	Federkonstante des Cantilevers
$k_B$	[J/K]	Boltzmann-Konstante, $k_B = 1.38066 \times 10^{-23}$ JK <sup>-1</sup>
$k_{eff}$	[N/m]	Effektive Federkonstante des Cantilevers
$L$	[ $\mu$ m]	Länge der Cantileverspitze
$L_{diff}$	[nm]	Diffusionslänge
$L_{eff}$	[nm]	Effektive Sammlungslänge
$\lambda$	[nm]	Wellenlänge
$m^*$	[ $\mu$ g]	Effektive Masse des Cantilevers
$N_{a,d}$	[cm <sup>-3</sup> ]	Konzentration der Akzeptoren bzw. Donatoren
$N_{in}$	[cm <sup>-2</sup> ]	Grenzflächenzustandsdichte
$N_{SS}$	[cm <sup>-2</sup> ]	Oberflächenzustandsdichte
$n_i$	[cm <sup>-3</sup> ]	Intrinsische Ladungsträgerkonzentration
$n, p$	[cm <sup>-3</sup> ]	Konzentration freier Elektronen bzw. Löcher
$\Phi$	[eV]	Austrittsarbeit
$\Delta\phi_S$	[eV]	Oberflächendipol
$\Delta\phi_{in}$	[eV]	Grenzflächendipol
$\varphi(\vec{r})$	[V]	Elektrisches Potential
$Q_{SS}$	[As]	Ladung der Oberflächenzustände
$Q_{SC}$	[As]	Ladung in der Raumladungszone
$QE(\lambda)$	–	Quanteneffizienz

Fortsetzung auf der nächsten Seite

---

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

---

$r$	[nm]	Radius der Cantileverspitze
$R$	[m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Rekombinationsrate
$R_S, R_P$	[Ω]	Serien- und Parallelwiderstand
$\rho(z)$	[cm <sup>-3</sup> ]	Ladungsträgerdichte
$T$	[K]	Temperatur
$T^*$	[K]	Charakteristische Temperatur für eine Störstellenverteilung
$\tau$	[s]	Lebensdauer der Ladungsträger
$V$	[V]	Spannung
$V_{ac}$	[V]	Wechselspannung zwischen Cantilever und Probe
$V_{dc}$	[V]	Kompensationsspannung zwischen Cantilever und Probe
$V_b$	[V]	Bandverbiegung
$V_{CP}$	[V]	Kontaktpotential
$V_D$	[V]	Diffusionsspannung
$V_{OC}$	[V]	Leerlaufspannung
$V_S$	[V]	Oberflächenbandverbiegung
$V_x, V_y, V_z$	[V]	Regelspannungen der Piezoelemente
$\omega$	[kHz]	Erste Resonanzfrequenz des Cantilevers
$\omega_2$	[kHz]	Zweite Resonanzfrequenz des Cantilevers
$\omega_{ac}$	[kHz]	Frequenz der Wechselspannung $V_{ac}$
$W_{SCR}$	[nm]	Weite der Raumladungszone
$W_{p,n}$	[nm]	Ausdehnung der Raumladungszone in den p- bzw. n-Halbleiter
$\chi$	[eV]	Elektronenaffinität
$\chi^*$	[eV]	Effektive Elektronenaffinität
$z_{min}$	[nm]	minimaler Spitzen-Proben-Abstand

---

## Abkürzungen

Tabelle B.3: Verwendete Abkürzungen

---

AFM	<u>A</u> tom <u>i</u> c <u>F</u> orce <u>M</u> icroscopy
AGC	<u>A</u> utom <u>a</u> t <u>i</u> c <u>G</u> ain <u>C</u> ontrol
ALD	<u>A</u> tom <u>i</u> c <u>L</u> ayer <u>D</u> eposition
AM	<u>A</u> mplit <u>u</u> den <u>M</u> odulation
CBD	<u>C</u> hem <u>i</u> cal <u>B</u> ath <u>D</u> eposition
CP	<u>C</u> ontact <u>P</u> otential
DH-Test	<u>D</u> amp- <u>H</u> eat-Test, Test zur beschleunigten Alterung von Solarzellen
EDX	<u>E</u> n <u>e</u> r <u>g</u> y <u>D</u> ispersive <u>X</u> -ray Analysis
EFM	<u>E</u> lectrostatic <u>F</u> orce <u>M</u> icroscopy
FM	<u>F</u> requenz <u>M</u> odulation
HOPG	<u>H</u> ighly <u>O</u> riented <u>P</u> yrolytic <u>G</u> raphite
KPFM	<u>K</u> elvin <u>P</u> robe <u>F</u> orce <u>M</u> icroscopy
LBM	<u>L</u> eitungsband <u>m</u> inimum
MFM	<u>M</u> agnetic <u>F</u> orce <u>M</u> icroscopy
PES	<u>P</u> hoto <u>E</u> lectron <u>S</u> pectroscopy
IPES	<u>I</u> nverse <u>P</u> hoto <u>E</u> lectron <u>S</u> pectroscopy
QE	<u>Q</u> uanteneffizienz
REM	<u>R</u> aster <u>E</u> lektronen <u>M</u> ikroskopie
rf	radio <u>f</u> requency
RTP	<u>R</u> apid <u>T</u> hermal <u>P</u> rocess
SCM	<u>S</u> canning <u>C</u> apacitance <u>M</u> icroscopy
SCR	<u>S</u> pace <u>C</u> harge <u>R</u> egion
SPM	<u>S</u> canning <u>P</u> robe <u>M</u> icroscopy
SPV	<u>S</u> urface <u>P</u> hoto <u>V</u> oltage
STM	<u>S</u> canning <u>T</u> unneling <u>M</u> icroscopy
TCO	<u>T</u> ransparent <u>C</u> onductive <u>O</u> xides
TEM	<u>T</u> ransmission <u>E</u> lectron <u>M</u> icroscopy
UHV	<u>U</u> ltra <u>h</u> igh <u>V</u> acuum
UPS	<u>U</u> ltraviolet <u>P</u> hotoelectron <u>S</u> pectroscopy
VBM	<u>V</u> alenzband <u>m</u> aximum
XES	<u>X</u> -Ray <u>E</u> mission <u>S</u> pectroscopy
XPS	<u>X</u> -Ray <u>P</u> hotoelectron <u>S</u> pectroscopy
XRD	<u>X</u> -Ray <u>D</u> iffraction

---

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Oberflächenbandverbiegung . . . . .	8
2.2	Lokale und absolute Austrittsarbeit . . . . .	11
2.3	Metall-Halbleiter-Übergänge . . . . .	13
2.4	Halbleiter-Heteroübergang mit Grenzflächendipol . . . . .	14
2.5	Quasi-Fermi-Niveaus an Oberflächen . . . . .	18
2.6	Oberflächenphotospannung an Heterostrukturen . . . . .	19
2.7	2D-Banddiagramm eines p/n-Heteroübergangs im Querschnitt . . . . .	21
3.1	REM-Aufnahmen eines Cantilevers . . . . .	25
3.2	Frequenzverschiebung in Abhängigkeit des minimalen Spitzen-Proben-Abstandes . . . . .	27
3.3	Schematische Darstellung der Spitzengeometrie . . . . .	28
3.4	Zur Definition des Kontaktpotentials . . . . .	29
3.5	Aufbau des Kelvinsondenkraftmikroskops im Ultrahochvakuum . . . . .	32
3.6	Histogramm zur Bestimmung der Austrittsarbeit . . . . .	34
3.7	3D-Grafik zur KPFM-Simulation der Spitzen-Proben-Wechselwirkung . . . . .	36
3.8	KPFM-Simulation einer Potentialstufe . . . . .	37
3.9	Kennlinie eines idealen p/n-Übergangs . . . . .	40
4.1	Aufbau einer Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzelle . . . . .	44
4.2	Optische Bandlücke von $Zn_{1-x}Mg_xO$ . . . . .	48
4.3	IV-Kennlinien und Quanteneffizienzen der pufferfreien Solarzellen . . . . .	50
4.4	IV-Kennlinien und Quanteneffizienz vor und nach einem Damp-Heat-Test . . . . .	53
4.5	Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Temperatur . . . . .	55
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenqualitätsfaktoren . . . . .	56
4.7	Temperaturabhängigkeit des seriellen und parallelen Widerstandes . . . . .	58
5.1	Proben für die Oberflächenmessungen . . . . .	62
5.2	XPS-Übersichtsmessungen des CIGSSe-Absorbers . . . . .	65
5.3	XPS-Übersichtsmessungen der CdS-Schicht . . . . .	66
5.4	XPS-Übersichtsmessungen der unbehandelten TCO-Schichten . . . . .	67
5.5	UPS- und IPES-Messung zur Bestimmung der Band- und Emissionskanten . . . . .	68
5.6	KPFM-Messung der unbehandelten CIGSSe-Oberfläche . . . . .	72
5.7	KPFM-Messung (SPV) der 5 min gesputterten CIGSSe-Oberfläche . . . . .	73

---

5.8	KPFM-Messung der unbehandelten CdS-Oberfläche . . . . .	75
5.9	Oberflächenphotospannung der CdS-Probe . . . . .	75
5.10	KPFM-Messung der unbehandelten i-ZnO-Oberfläche . . . . .	77
5.11	Oberflächenphotospannung der (Zn,Mg)O-, der i-ZnO- und der ZnO:Ga-Probe . . . . .	78
5.12	KPFM-Messung der unbehandelten (Zn,Mg)O-Oberfläche . . . . .	79
5.13	KPFM-Messung der unbehandelten ZnO:Ga-Oberfläche . . . . .	80
6.1	Licht-mikroskopische Aufnahme einer typischen Querschnittsprobe . . . . .	86
6.2	TEM-Übersichts- und Detailaufnahmen der Querschnittsproben . . . . .	87
6.3	KPFM-Messung des im UHV gespaltenen TCO-Querschnitts . . . . .	89
6.4	KPFM-Übersichtsaufnahme des polierten TCO-Querschnitts . . . . .	90
6.5	KPFM-Detailaufnahme und Profil des TCO-Querschnitts . . . . .	91
6.6	3D KPFM-Abbildung eines Solarzellen-Querschnitts . . . . .	92
6.7	KPFM-Aufnahme und Profil des CdS-Querschnitts . . . . .	93
6.8	KPFM-Aufnahme und Profil des i-ZnO-Querschnitts . . . . .	94
6.9	KPFM-Aufnahme und Profil des (Zn,Mg)O-Querschnitts . . . . .	94
6.10	Simulation der KPFM-Querschnittsmessungen . . . . .	98
6.11	Diffusionsspannung in Abhängigkeit des Spitzen-Proben-Abstandes . . . . .	99
7.1	Aus den Oberflächenmessungen bestimmte Bandschemata der einzelnen Schichten . . . . .	102
7.2	SCAPS-Simulation des Bandverlaufs der (Zn,Mg)O bzw. i-ZnO Solarzelle . . . . .	105
A.1	Resonanzkurven der Grund- und der ersten Oberschwingung der verwendeten Cantilever . . . . .	110

# Tabellenverzeichnis

4.1	Standard-Sputterparameter . . . . .	47
4.2	Probendefinition der untersuchten Solarzellen . . . . .	49
4.3	IV- und QE-Parameter der pufferfreien Solarzellen . . . . .	50
4.4	IV- und QE-Parameter vor und nach einem DH-Test . . . . .	54
4.5	Aktivierungsenergien aus den temperatur- und intensitätsabhängigen IV-Messungen . . . . .	57
5.1	LBM, VBM und Austrittsarbeit der UPS / IPES-Messungen . . . . .	69
5.2	Austrittsarbeit und Oberflächenphotospannung der KPFM-Messungen . . . . .	81
5.3	Zusammenfassung der Oberflächenmessungen . . . . .	82
6.1	Zusammenfassung der Querschnittsmessungen . . . . .	95
7.1	Elektronenaffinitäten berechnet aus den Ergebnissen der UPS / IPES-Messungen . . . . .	104
B.1	Solarzellenparameter für die Verwendung von (Zn,Mg)O mit anderen Absorbermaterialien . .	112
B.2	Verwendete Symbole und Einheiten . . . . .	113
B.3	Verwendete Abkürzungen . . . . .	116

