

Abkürzungen und Symbole

Symbole

Tabelle B.2: Verwendete Symbole und Einheiten

A	–	Diodenqualitätsfaktor
$A_{1,2}$	[eV]	Absorptionskanten der QE-Spektren
$\alpha(\lambda)$	[m ⁻¹]	Absorptionskoeffizient
β	[°]	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
ΔE_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_ℓ	[eV]	Lage des lokalen Vakuumniveaus
E_{photon}	[eV]	Photonenenergie
E_V	[eV]	Lage des Valenzbandmaximums
ΔE_V	[eV]	Valenzbanddiskontinuität
E_{Vac}	[eV]	Lage des Vakuumniveaus

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung von der vorhergehenden Seite

ϵ_0	[As/Vm]	Dielektrizitätskonstante, $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ As/Vm
$\epsilon_{p,n}$	–	relative Dielektrizitätskonstanten des p- bzw. n-Halbleiters
ϵ_S	[As/Vm]	Dielektrizitätskonstante des Halbleiters
η	[%]	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 ²]	Beleuchtungsintensität
J	[A/m ²]	Stromdichte
J_0	[A/m ²]	Sperrsättigungsstromdichte
J_{ph}	[A/m ²]	Photostromdichte
J_{SC}	[A/m ²]	Kurzschlussstromdichte
k	[N/m]	Federkonstante des Cantilevers
k_B	[J/K]	Boltzmann-Konstante, $k_B = 1.38066 \times 10^{-23}$ JK ⁻¹
k_{eff}	[N/m]	Effektive Federkonstante des Cantilevers
L	[μ m]	Länge der Cantileverspitze
L_{diff}	[nm]	Diffusionslänge
L_{eff}	[nm]	Effektive Sammlungslänge
λ	[nm]	Wellenlänge
m^*	[μ g]	Effektive Masse des Cantilevers
$N_{a,d}$	[cm ⁻³]	Konzentration der Akzeptoren bzw. Donatoren
N_{in}	[cm ⁻²]	Grenzflächenzustandsdichte
N_{SS}	[cm ⁻²]	Oberflächenzustandsdichte
n_i	[cm ⁻³]	Intrinsische Ladungsträgerkonzentration
n, p	[cm ⁻³]	Konzentration freier Elektronen bzw. Löcher
Φ	[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 ⁻³ s ⁻¹]	Rekombinationsrate
R_S, R_P	[Ω]	Serien- und Parallelwiderstand
$\rho(z)$	[cm ⁻³]	Ladungsträgerdichte
T	[K]	Temperatur
T^*	[K]	Charakteristische Temperatur für eine Störstellenverteilung
τ	[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
ω	[kHz]	Erste Resonanzfrequenz des Cantilevers
ω_2	[kHz]	Zweite Resonanzfrequenz des Cantilevers
ω_{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
χ	[eV]	Elektronenaffinität
χ^*	[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

