

# Anhang A

## Reaktionen in der H<sub>2</sub>/I<sub>2</sub>-Gasphase

In einem H<sub>2</sub>/I<sub>2</sub>-Gasgemisch sind die in Tabelle A.1 aufgeführten Reaktionen zwischen den Spezies H<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, H, I und HI möglich. Die Geschwindigkeitskonstanten  $k$ , mit der die jeweiligen Reaktionen ablaufen, sind durch

$$k = AT^\beta e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (\text{A.1})$$

gegeben, wobei  $E_A$  die Aktivierungsenergie der Reaktion angibt und  $A$  den sogenannten präexponentiellen Faktor. Die Größe  $\beta$  drückt eine Temperaturabhängigkeit der Form  $T^\beta$  aus, die hier nur für die H<sub>2</sub>-Bildung aus atomarem Wasserstoff relevant ist.

**Tabelle A.1:** Mögliche Reaktionen zwischen den Gasspezies in der H<sub>2</sub>/I<sub>2</sub>-Gasphase, sowie die für die jeweiligen Reaktionen charakteristischen Werte von  $A$ ,  $E_A$  und  $\beta$

Reaktion	$A$	$E_A$	$\beta$
I <sub>2</sub> → 2I	8,25 e+10 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	-1,268 e+08 J/kmol	0
2I → I <sub>2</sub>	2,36 e+08 cm <sup>6</sup> kmol <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	-6,276 e+06 J/kmol	0
I + H <sub>2</sub> → HI + H	1,69 e+11 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1,408 e+08 J/kmol	0
HI + H → I + H <sub>2</sub>	4,74 e+10 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	2,740 e+06 J/kmol	0
H + I <sub>2</sub> → HI + I	4,31 e+11 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1,803 e+06 J/kmol	0
H <sub>2</sub> + I <sub>2</sub> → 2HI	1,94 e+11 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1,714 e+08 J/kmol	0
2HI → H <sub>2</sub> + I <sub>2</sub>	2,55 e+10 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	1,831 e+08 J/kmol	0
H <sub>2</sub> → 2H	9,03 e+11 cm <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	4,02 e+08 J/kmol	0
2H → H <sub>2</sub>	9,79 e+10 cm <sup>6</sup> kmol <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0	-0,6

# Anhang B

## Grundgleichungen des Stromtransports

**Transportgleichungen** Die Transportgleichungen für Elektronen und Löcher ergeben sich aus der Summe von Drift- und Diffusionsstromdichte. Die Stromdichte der Elektronen lautet [Gre82]

$$J_n = \underbrace{q\mu_n n \vec{E}}_{\text{Driftstromdichte}} + \underbrace{qD_n \frac{dn}{dx}}_{\text{Diffusionsstromdichte}} \quad (\text{B.1})$$

$\mu_n$  gibt hier die Beweglichkeit der Elektronen und  $D_n$  deren Diffusionskonstante an. Die Transportgleichung für Löcher ergibt sich analog zu

$$J_p = q\mu_p p \vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{B.2})$$

Die Beweglichkeiten  $\mu_{n,p}$  und die Diffusionskonstanten  $D_{n,p}$  sind über die Einstein-Relation korreliert:

$$\frac{D_{n,p}}{kT} = \frac{\mu_{n,p}}{q} \quad (\text{B.3})$$

**Poissongleichung** Die Poissongleichung leitet sich aus den Maxwellschen Gleichungen der Elektrostatik ab und verknüpft das elektrische Potential  $\varphi$  mit der Raumladungsdichte  $\rho$  [Gre82]

$$-\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{d\vec{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0\epsilon_r}, \quad (\text{B.4})$$

wobei  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante des Vakuums angibt und  $\epsilon_r$  die relative Dielektrizitätskonstante des Materials. Die Raumladungsdichte  $\rho$  ergibt sich aus den Ladungsträgerdichten  $n$  und  $p$  der Elektronen und Löcher und den Ladungen der ionisierten Donatoren bzw. Akzeptoren  $N_D^+$ ,  $N_A^-$

$$\rho = p - n + N_D^+ - N_A^- \quad (\text{B.5})$$

**Kontinuitätsgleichung** Die Kontinuitätsgleichung für die Gesamtstromdichte  $J_G = J_n + J_p$  lautet im stationären Fall ( $\frac{d\rho}{dt} = 0$ ) [Gre82]

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad (\text{B.6})$$

das heißt die Summe aus Elektronen- und Löcherstromdichte ist konstant über dem Ort. Für die einzelnen Ladungsträgerarten gilt

$$\frac{1}{q} \operatorname{div} J_n + R - G = 0 \quad (\text{B.7})$$

$$-\frac{1}{q} \operatorname{div} J_p + R - G = 0 \quad (\text{B.8})$$

wobei  $R$  die Rekombinationsrate und  $G$  die Generationsrate der Ladungsträger in  $[\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}]$  beschreibt. Elektronen- und Löcherstromdichte sind im Gegensatz zur Gesamtstromdichte Funktionen des Ortes.

# Anhang C

## Auflösungsvermögen der EDX–Methode

Unter Berücksichtigung von elastischen Streuprozessen und den mit der inelastischen Streuung einhergehenden Energieverlusten wurde von Kanaya und Okayama [Kan72] die Eindringtiefe  $x_e$  der Primärelektronen mit

$$x_e[\mu m] = \frac{0,0276AE_0^{1,67}}{\rho Z^{0,89}} \quad (C.1)$$

angegeben, wobei  $E_0$  die Energie der Primärelektronen in [keV] angibt.  $A$  bezeichnet das Atomgewicht in [g/mol],  $\rho$  die Dichte in [g/cm<sup>3</sup>] und  $Z$  die Ordnungszahl des Elementes. Das Anregungsvolumen beschreibt näherungsweise einen Halbkreis mit Radius  $x_e$ , dessen Mittelpunkt durch den Strahl der Primärelektronen bestimmt ist.

Charakteristische Röntgenstrahlung kann nur bis zur einer maximalen Tiefe  $x_r$  generiert werden, in der die Energie der anregenden Elektronen mindestens so groß wie die nötige Anregungsenergie  $E_c$  ist:

$$x_r = \frac{0,0276A}{\rho Z^{0,89}} (E_0^{1,67} - E_c^{1,67}) \quad (C.2)$$

Bei einer Anregungsenergie von 5 kV werden die  $L_\alpha$ –Linien der hier untersuchten Elemente Cu, In, Se und Zn angeregt, deren maximale Erzeugungstiefe bei  $\approx 0,2 \mu m$  liegt (vergleiche Tabelle C.1).

Monte Carlo Simulationen der Elektronen–Trajektorien zeigen, dass die Generation der Röntgenstrahlung innerhalb dieses Bereiches nicht gleichmäßig erfolgt, sondern eine Funktion des Ortes ist. Nahe der Probenoberfläche steigt die relative Anzahl generierter Röntgenstrahlen an, erreicht ein Maximum und fällt anschließend bis zur maximalen Tiefe  $x_r$  auf Null ab. Analytisch kann die Generationsfunktion  $\Psi(\rho x)$  in Abhängigkeit der Massen–Tiefe  $\rho x$  als modifiziertes Gauss–Profil beschrieben werden (Packwood–Brown Gleichung) [Gol92]:

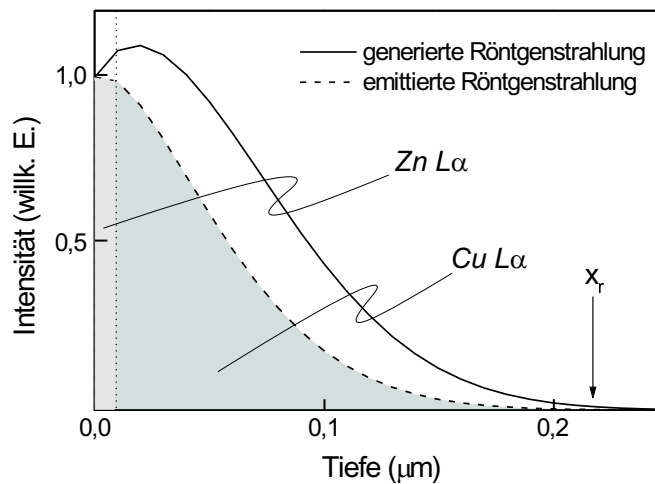
$$\Psi(\rho x) = \underbrace{\gamma \exp(-\kappa^2(\rho x)^2)}_{\text{Gauss-Profil}} - (\gamma - \Psi(0)) \exp(-\kappa^2(\rho x)^2 - \beta \rho z) \quad (C.3)$$

**Tabelle C.1:** Maximale Erzeugungstiefe der charakteristischen Röntgenemissionen nach Gleichung (C.2) für Beschleunigungsspannungen von 5 kV [Gol92]

	$A$	$\rho$	$Z$	$E_c$	$x_e$
	[g/mol]	[g/cm <sup>3</sup> ]		[keV]	[ $\mu\text{m}$ ]
Cu $L_\alpha$	63,546	5,761 (CIGSS)	29	0,930	0,21
In $L_\alpha$	114,818	5,761 (CIGSS)	49	3,287	0,13
Se $L_\alpha$	78,96	5,761 (CIGSS)	34	1,379	0,21
Zn $L_\alpha$	65,39	5,27 (ZnSe)	30	1,012	0,23

Hier stellt  $\gamma$  einen Skalierungsfaktor dar, der den Maximalwert des Gauss-Profiles festlegt. Die Größe  $\kappa$  beschreibt das Abklingverhalten der Gaussfunktion und ist physikalisch mit der maximalen Erzeugungstiefe über  $\kappa \approx \frac{2}{x_r}$  verknüpft. Der zweite Term, der das Gauss-Profil nahe der Probenoberfläche modifiziert, berücksichtigt über den Parameter  $\beta$  elastische Streuprozesse beim Eintritt des Elektronenstrahls in das Probenmaterial.

Von den generierten Röntgenstrahlen wird ein Teil innerhalb des Materials absorbiert. Die Intensität der emittierten Röntgenstrahlen ergibt sich daher aus der Integration über die Funktion  $\Psi(\rho x) \cdot e^{-\alpha_{ed}x}$ . In Abbildung C.1 ist der qualitative Verlauf der generierten und emittierten Röntgenstrahlung über der Erzeugungstiefe aufgetragen, wie er sich für Cu bzw. Zn  $L_\alpha$ -Linien ergibt. Aus dem Intensitätsverhältnis der emittierten Röntgenstrahlung kann eine maximal zu detektierende Dicke einer Zn-haltigen Schicht mit etwa 10 nm abgeschätzt werden. Angenommen wurde dabei eine Nachweisgrenze des Elementverhältnisses [Zn]:[Cu] von 10 %, was wegen der unmittelbar benachbarten Emissionslinien realistisch ist.



**Abbildung C.1:** Qualitativer Verlauf von generierter und emittierter Röntgenstrahlung über der Erzeugungstiefe

# Anhang D

## $R_S$ -Korrektur der gemessenen Quantenausbeute

Für die quantitative Auswertung wurde die Quantenausbeute um den Einfluss des Serienwiderstandes  $R_S$  korrigiert (vergleiche Kapitel 6.4.1). Gemäß Gleichung (6.50) ergibt sich der Serienwiderstand  $R_S$  aus der Steigung der Auftragung  $QE(0)/QE(V)$  über  $J(V) - J(0)$  nach

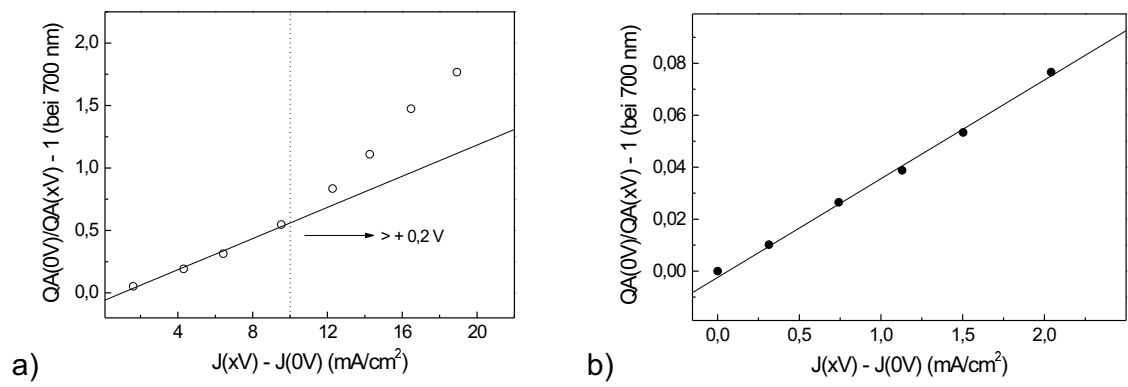
$$\frac{QA(0V)}{QA(xV)} = 1 + \frac{q}{nkT} R_S (J(0V) - J(xV)), \quad (D.1)$$

wenn der Diodenfaktor  $n$  bekannt ist. Die Stromdichte  $J(V)$  wird aus der Quantenausbeute-Messung nach

$$J(V) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} QA(\lambda) \cdot \text{AM 1.5}(\lambda) \frac{q \cdot hc}{\lambda}, \quad (D.2)$$

bestimmt, wobei AM 1.5 ( $\lambda$ ) die Leistungsdichte des AM 1.5 Sonnenspektrums pro Wellenlänge in  $[\text{W}/\text{cm}^2]$  angibt. Die in Gleichung D.1 ausgenutzte Beziehung  $J_D = J(0V) - J(xV)$  ist nur für einen spannungsunabhängigen Photostrom gegeben. Die Anpassung erfolgte daher nur für kleine positive Spannungen (Abbildung D.1), für die  $J_P \approx \text{const.}$  gilt.

Abbildung D.1 zeigt die Auftragung von  $QA(0V)/QA(xV) - 1$  über der absoluten Stromdifferenz  $|J(0V) - J(xV)|$ . Aus der linearen Anpassung für kleine positive Spannungen ergibt sich aus Gleichung (D.1) der Serienwiderstand  $R_S$ . Die dabei verwendeten Diodenparameter stammen aus der Analyse der IU-Kennlinien im Dunkeln. Für die CVD-ZnSe gepufferte Zelle ergibt sich mit  $n = 1,5$  ein Serienwiderstand von  $R_S = 2,4 \Omega$ , für die CBD-CdS Referenz ist  $R_S = 2,2 \Omega$  (mit  $n = 2,3$ ). Die im Vergleich zur IU-Messung (siehe Abschnitt 9.1) größeren Werte folgen aus der jeweiligen Kontaktierung der Solarzellen. Im Gegensatz zur Strom-Spannungs-Messung sind die Kontaktwiderstände bei der Quantenausbeute-Messung nicht mehr zu vernachlässigen.



**Abbildung D.1:**  $QA(0V)/QA(xV) - 1$  über der absoluten Stromdifferenz  $|J(0V) - J(xV)|$  und lineare Anpassung nach Gleichung D.1





# Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

cps	counts per second
CSVT	Close-Spaced Chemical Vapour Transport
CVD	Chemische Gasphasendeposition (engl.: Chemical Vapour Deposition)
EDX	energie-dispersive Röntgenspektroskopie (engl.: Energy Dispersive X-ray spectroscopy)
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
MOCVD	Metallorganische Gasphasendeposition (engl.: MetalOrganic Chemical Vapour Deposition)
PL	Photolumineszenz
QA	Quantenausbeute
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SPV	Split-Pseudo-Voigt
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
XRD	Röntgendiffraktometrie (engl.: X-Ray Diffraction)

## Naturkonstanten

$c$	$2,997925 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit
$\epsilon_0$	$8,85419 \cdot 10^{-13} \text{ J}^{-1}\text{C}^2\text{cm}^{-1}$	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$h$	$6,62618 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Plancksche Konstante
$k$	$1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	Boltzmannkonstante
$q$	$1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
$R$	$8,31441 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$	Gaskonstante

# Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	[m <sup>-1</sup> ]	Absorptionskoeffizient
$\alpha_b$	[m <sup>-1</sup> ]	Absorptionskoeffizient des Puffers
$a$	[m]	Gitterkonstante
$\chi$	[eV]	Elektronenaffinität
$C$	[F]	Kapazität
$C_A$	[F/m <sup>2</sup> ]	flächenbezogene Kapazität
$d_b$	[m]	Dicke des Puffers
$D$	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusionskonstante
$\epsilon_r$		relative Dielektrizitätskonstante
$\eta$	[%]	Wirkungsgrad
$\vec{E}$	[V/m]	elektrisches Feld
$E_A$	[J/mol]	Aktivierungsenergie (siehe auch Anhang A)
$\Delta E_C$	[eV]	Leitungsbandversatz
$E_G$	[eV]	Bandlücke
$E_S$	[eV]	Aktivierungsenergie einer tiefen Störstelle
$EN$		Elektronennegativität
$FF$		Füllfaktor
$\Gamma$		Sammlungsfunktion
$\Gamma_{Puffer}$		Sammlungsfunktion innerhalb des Puffers
$G$	[ $\Omega^{-1}$ ]	Leitwert
$I_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	eingestrahle Lichtintensität
$J_0$	[A/m <sup>2</sup> ]	Sperrsättigungsstromdichte
$J_{max}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Stromdichte bei maximaler Leistung
$J_{SC}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Kurzschlussstromdichte
$k$	i.A. [m <sup>3</sup> /mols]	Geschwindigkeitskonstante (siehe auch Anhang A)
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$L$	[m]	Eindringtiefe des eingestrahltten Lichtes
$L_{diff}$	[m]	Diffusionslänge
$L_{eff}$	[m]	effektive Sammlungslänge
$\mu$	[m <sup>2</sup> /Vs]	Beweglichkeit
$m_{n,p}^*$	[kg]	effektive Masse der Elektronen ( $n$ ) bzw. Löcher ( $p$ )
$n$		Diodenfaktor
$n$	[m <sup>-3</sup> ]	Dichte freier Elektronen
$n_1$	[m <sup>-3</sup> ]	ergibt sich mit $E_S = E_F$ aus der Dichte freier Elektronen
$n_i$	[m <sup>-3</sup> ]	intrinsische Ladungsträgerkonzentration
$N_A$	[m <sup>-3</sup> ]	Dichte flacher Akzeptoren
$N_{A,eff}$	[m <sup>-3</sup> ]	effektive Dotierung (Summe aus Dotierdichte $N_A$ und Störstellendichte $N_D$ )
$N_b$	[m <sup>-3</sup> ]	Ladungsträgerdichte des Puffers

$N_D$	$[\text{m}^{-3}]$	Dichte flacher Donatoren
$N_{D,i}$	$[\text{m}^{-2}]$	Dichte donatorischer Störstellen an der Puffer/CIGSS-Grenzfläche
$N_L$	$[\text{m}^{-3}]$	Zustandsdichte im Leitungsband
$N_S$	$[\text{m}^{-3}]$	Dichte tiefer Störstellen
$N_V$	$[\text{m}^{-3}]$	Zustandsdichte im Valenzband
$\omega$	$[\text{s}^{-1}]$	Kreisfrequenz
$\omega_0$	$[\text{s}^{-1}]$	charakteristische Grenzfrequenz einer Störstelle
$\Phi$	$[\text{m}^{-2}]$	Photonenfluss
$p$	$[\text{m}^{-3}]$	Dichte freier Löcher
$p_1$	$[\text{m}^{-3}]$	ergibt sich mit $E_S = E_F$ aus der Dichte freier Löcher
$P$	[W]	Leistung
$P_{in}$	[W]	eingestrahlte Lichtleistung
$P_{RP}$		relativer Leistungsverlust durch den Einfluss des Parallelwiderstandes
$P_{RS}$		relativer Leistungsverlust durch den Einfluss des Serienwiderstandes
$Q_i$	$[\text{C}/\text{m}^{-2}]$	Flächenladungsdichte an der Puffer/CIGSS-Grenzfläche
$Q_n$	$[\text{C}/\text{m}^{-2}]$	Flächenladungsdichte
$R$	$[\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$	Rekombinationsrate
$R_P$	$[\Omega\text{m}^2]$	Parallelwiderstand
$R_S$	$[\Omega\text{m}^2]$	Serienwiderstand
$S_n$	$[\text{m}/\text{s}]$	Grenzflächenrekombinationsgeschwindigkeit der Elektronen
$\tau_0$	[s]	minimale Lebensdauer der Ladungsträger
$\tau_{n0}$	[s]	minimale Lebensdauer der Elektronen
$\tau_{p0}$	[s]	minimale Lebensdauer der Löcher
$T$	[K]	Temperatur
$\varphi$	[V]	elektrisches Potential
$\vartheta$	[°]	Einstrahlwinkel des Sonnenlichtes
$\vec{v}$	$[\text{m}/\text{s}]$	Geschwindigkeit
$v_{dr}$	$[\text{m}/\text{s}]$	Driftgeschwindigkeit
$v_{th}$	$[\text{m}/\text{s}]$	thermische Geschwindigkeit der Ladungsträger
$v_z$	$[\text{m}/\text{s}]$	Geschwindigkeitskomponente in $z$ -Richtung
$V_D$	[V]	Diffusionsspannung
$V_{max}$	[V]	Spannung bei maximaler Leistung
$V_{OC}$	[V]	Leerlaufspannung
$w$	[m]	Raumladungszonenweite
$w_a$	[m]	Raumladungszonenweite im Absorber
$w_a^*$	[m]	Summe aus Raumladungszonenweite im Absorber und Dicke des Puffers ( $w_a + d_b$ )
$\xi$	[eV]	Energiedifferenz von $E_{Fp}$ und $E_V$ im Bahngebiet des Absorbers
$\xi_0$	$[\text{K}^{-2}\text{s}^{-1}]$	Emissionsrate
$x$	[m]	Ortsangabe
$Y$	$[\Omega^{-1}]$	komplexer Leitwert (Admittanz)



# Literaturverzeichnis

- [Aix] AIXTRON AG. Kackertstr. 15-17, 52072 Aachen, Germany
- [Alb00a] V. Alberts, M. Chenene, O. Schenker und E. Bucher. *Preparation of CuInSe<sub>2</sub> thin films by rapid thermal processing of Se-containing precursors*. J. Mat. Sci.: Mat. Elec., 11 (2000), S. 285
- [Alb00b] V. Alberts und P. Molefe. *Formation of CuInSe<sub>2</sub> thin films by H<sub>2</sub>Se/Ar treatment of thermally evaporated metallic precursors from a single crucible*. Jap. J. Appl. Phys., 39 (2000) (4A), S. 1650
- [Atk92] P. W. Atkins. *The elements of physical chemistry*. Oxford University Press, Oxford, Great Britain, 1992
- [Ave67] M. Aven und J. S. Prener (Hg.). *Physics and chemistry of II-VI compounds*. North-Holland, Amsterdam, 1967
- [Bai79] F. Bailly, G. Cohen-Solal und J. Mimila-Arroya. *Simplified theory of reactive close-spaced vapor transport*. J. Electrochem. Soc., 126 (1979), S. 1604
- [Bai80] J. Baillou, J. Daunay, P. Bugnet, J. Daunay, C. Auzary und R. Poindessault. *Optical absorption edge in doped and undoped ZnSe crystals*. J. Phys. Chem. Solids, 41 (1980), S. 295
- [Bal89] G. S. Bales, A. C. Redfield und A. Zangwill. *Growth dynamics of chemical vapour deposition*. Phys. Rev. Lett., 62 (1989) (7), S. 776
- [Bau81a] D. L. Baulch, C. J. Cobos, R. A. Cox, C. Esser, P. Frank, T. Just, J. A. Kerr, M. J. Pilling, J. Troe, R. W. Walker und J. Warnatz. *Evaluated kinetic data for combustion modelling*. J. Phys. Chem. Ref. Data, 21 (1981) (3), S. 411
- [Bau81b] D. L. Baulch, J. Duxbury, S. J. Grant und D. C. Montague. *Evaluated kinetic data for high temperature reactions*. J. Phys. Chem. Ref. Data, 10 (1981) (Suppl. 1), S. 469
- [Bau96] G. Bauer und W. Richter (Hg.). *Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996

- [Bau99] A. Bauknecht, U. Blieske, T. Kampschulte, J. Albert, H. Sehnert, M. C. Lux-Steiner, A. Klein und W. Jaegermann. *Band offsets and the ZnSe/CuGaSe<sub>2</sub> (001) heterointerface*. Appl. Phys. Lett., 74 (1999) (8), S. 1099
- [Bet90] K. Bethge und G. Gruber. *Physik der Atome und Moleküle*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1990
- [Bod00] M. Bodegard, O. Lundberg, J. Malmström, L. Stolt und A. Rockett. *High voltage Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> devices with Ga-profiling fabricated using co-evaporation*. In *Proc. 28<sup>th</sup> IEEE PVSEC*. Anchorage, Alaska, 2000
- [Bur00] M. Burgelman, P. Nollet und S. Degrave. *Modeling polycrystalline semiconductor solar cells*. Thin Solid Films, 361 (2000), S. 527
- [Cah89] D. Cahen und R. Noufi. *Defect chemical explanation for the effect of air anneal on CdS/CuInSe<sub>2</sub> solar cell performance*. Appl. Phys. Lett., 54 (1989) (6), S. 558
- [Cai00] L. M. Caicedo, G. Cediél, A. Dussan, J. W. Sandino, C. Calderón und G. Gordillo. *Study of optical, morphological and structural properties of ZnSe thin films deposited by evaporation*. Phys. Stat. Sol. (b), 220 (2000), S. 249
- [Cha00] A. M. Chaparo, R. Bayón, M. T. Gutiérrez, J. Herrero, J. Klaer, K. Siemer und D. Bräunig. *Comparative study of high efficiency thin film solar cells based on CuInS<sub>2</sub> absorber and alternative buffer layers*. In *Proc. 16<sup>th</sup> E-PVSEC*. Glasgow, 2000
- [Cla73] R. Clanget. *Ionized impurity scattering in degenerate In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Appl. Phys., 2 (1973), S. 247
- [Con97] M. A. Contreras, B. Egaas, P. Dippo, J. Webb, S. Asher, A. Swartzlander, K. Ramanathan, F. S. Hasoon und R. Noufi. *On the role of Na and modifications to Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> absorber materials using thin-MF (M = Na, K, Cs) precursor layers*. In *Proc. 26<sup>th</sup> IEEE PVSC*. Anaheim, California, 1997
- [Con99] M. A. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Swartzlander, F. Hasoon und R. Noufi. *Progress towards 20% efficiency in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> polycrystalline thin-film solar cells*. Progress in Photovoltaics, 7 (1999), S. 311
- [Con00] M. A. Contreras, K. M. Jones, L. Gedvilas und R. Matson. *Preferred orientation in polycrystalline Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> and its effect on absorber thin-films and devices*. In *Proc. 16<sup>th</sup> E-PVSEC*. Glasgow, 2000
- [Dje00] K. Djessas, G. Massé und M. Ibannaim. *CuInS<sub>2</sub> thin films for solar cell application*. J. Electrochem. Soc., 147 (2000) (4), S. 1235
- [Dy100] T. Dylla. *Charakterisierung von CuGaSe<sub>2</sub>-Dünnschicht-Solarzellen hergestellt mit chemischer Gasphasenabscheidung*. Diplomarbeit, Freie Universität Berlin (2000)

- [Eis00] W. Eisele, A. Ennaoui, P. Schubert-Bischoff, M. Giersig, C. Pettenkofer, J. Krauser, M. Lux-Steiner, T. Riedle, N. Esser, S. Zweigart und F. Karg. *New cadmium-free buffer layers as heterojunction partners on Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> thin film solar cells*. In *Proc. 28<sup>th</sup> IEEE PVSC*. Anchorage, Alasaka, 2000
- [Eng98] F. Engelhardt, L. Bornemann, M. Köntges, T. Meyer, J. Parisi, E. Pschorr-Schoberer, B. Hahn, W. Gebhardt, W. Riedl, F. Karg und U. Rau. *Interface characterization of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells containing a new ZnSe buffer layer*. In *Proc. 2<sup>nd</sup> WCPEC*. Vienna, Austria, 1998
- [Eng99] F. Engelhardt, L. Bornemann, M. Köntges, T. Meyer, J. Parisi, E. Pschorr-Schoberer, B. Hahn, W. Gebhardt, W. Riedl und U. Rau. *Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with a ZnSe buffer layer: Interface characterization by quantum efficiency measurements*. *Progress in Photovoltaics*, 7 (1999), S. 423
- [Enn98] A. Ennaoui, U. Blieske und M. C. Lux-Steiner. *13.7%-efficient Zn(Se,OH)<sub>x</sub>/Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> thin film solar cell*. *Prog. Photovoltaics: Research and Application*, 6 (1998), S. 447
- [Enn99] A. Ennaoui. *Chemical bath process for highly efficient Cd-free chalcopyrite thin-film-based solar cells*. *Can. J. Phys.*, 77 (1999), S. 723
- [Eri90] G. Eriksson und K. Hack. *Chemsage - a computer program for the calculation of complex chemical equilibria*. *Metallurgical Transactions B*, 21 (1990), S. 1013
- [Ero85] M. Eron und A. Rothwarf. *Interface charging and solar-cell characteristics: CuInSe<sub>2</sub>/CdS*. *J. Appl. Phys.*, 57 (1985), S. 2275
- [Fah83] A. L. Fahrenbruch und R. H. Bube. *Fundamentals of solar cells*. Academic Press, Inc., New York, 1983
- [Fis00] D. Fischer. *Eigenschaften von CuGaSe<sub>2</sub>-Dünnschichten hergestellt mit chemischer Gasphasenabscheidung*. Dissertation, Freie Universität Berlin (2000)
- [Fis01] D. Fischer, N. Meyer, M. Kuczmik, M. Beck, A. Jäger-Waldau und M. C. Lux-Steiner. *CVD of CuGaSe<sub>2</sub> for thin film solar cells with various transport agents*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67 (2001) (1-4), S. 105
- [flu] *Fluent Incorporated*. Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NL 03766
- [Fri98] W. Fritsch und U. Wille. *Simulation of gas flow and chemical reactions in a close-spaced vapor-transport reactor*. In *Proc. Annual Meeting of the Fluid Dynamics Division of the APS*. Philadelphia, 1998

- [Fuj94] S. Fujita, T. Asano, K. Maehara, T. Tojyo und S. Fujita. *Photo-assisted metalorganic vapor-phase epitaxy for nitrogen-doping and fabrication of blue-green light emitting devices of ZnSe-based semiconductors*. J. Cryst. Growth, 138 (1994), S. 737
- [Fuj98] S. Fujiwara, Y. Namikawa, Y. Hirota, M. Irikura, K. Matsumoto und T. Kotani. *Growth of ZnSe single crystal by CVT method with self-moving convection shield*. J. Cryst. Growth, 196 (1998), S. 83
- [Fuk90] S. Fuke, T. Imai, S. Irisawa und K. Kuwahara. *Iodine-doping effects on the vapor-phase epitaxial growth of ZnSe on GaAs substrates*. J. Appl. Phys., 67 (1990), S. 247
- [Fuk94] S. Fuke, Y. Suzuki, K. Kuwahara, Y. Takano und T. Imai. *Orientation dependences of the growth rate and iodine incorporation for the ZnSe growth by hydrogen transport vapor phase epitaxy*. J. Cryst. Growth, 144 (1994), S. 367
- [Gay97] R. Gay. *Status and prospects for CIS-based photovoltaics*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 47 (1997), S. 19
- [Ger00] A. Gerhard. *Elektrische Defektspektroskopie an CuGaSe<sub>2</sub> und verwandten Halbleiterdünnschichten*. Dissertation, Freie Univesität Berlin (2000)
- [Goe94] A. Goetzberger, B. Voß und J. Knobloch. *Sonnenenergie: Photovoltaik*. Teubner, Stuttgart, 1994
- [Gol92] J. I. Goldstein. *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. Plenum Press, New York, 1992
- [Gär59] W. W. Gärtner. *Depletion-layer photoeffects in semiconductors*. Phys. Rev., 116 (1959) (1), S. 84
- [Gre82] M. A. Green. *Solar Cells*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1982
- [Gre01] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, S. Igari und W. Warta. *Solar cell efficiency tables (version 17)*. Progress in Photovoltaics, 9 (2001), S. 49
- [Gue98] K. Guenoun, K. Djessas und G. Massé. *Temperature distribution and transport mode in a close-space vapor transport reactor for CuInSe<sub>2</sub> depositions*. J. Appl. Phys., 84 (1998), S. 589
- [Gut90] J. Gutowski, N. Presser und G. Kudlek. *Optical properties of ZnSe epilayers and films*. Phys. Stat. Sol. (a), 120 (1990), S. 11
- [Haa91] M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt und H. Cheng. *Blue-green laser diodes*. Appl. Phys. Lett., 59 (1991) (11), S. 1272
- [Hah98] B. Hahn, E. Pschorr-Schoberer, E. Griehl, M. Kastner und W. Gebhardt. *Metalorganic chemical vapor deposition of ZnSe films on glass and GaAs(111) substrates*. J. Cryst. Growth, 191 (1998), S. 65



- [Hal52] R. N. Hall. *Electron-hole recombination in germanium*. Phys. Rev., 87 (1952), S. 387
- [Han00] G. Hanna, A. Jasenek, U. Rau und H. W. Schock. *Open circuit voltage limitations in  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  thin-film solar cells - dependence on alloy composition*. Phys. Stat. Sol. (a), 179 (2000), S. R7
- [Har74] H. Hartmann. *Über die Züchtung von ZnS-, ZnSe- und ZnTe-Einkristallen unter Anwendung der chemischen Transportreaktion*. Kristall und Technik, 9 (1974) (7), S. 743
- [Har75] H. Hartmann. *Vapour phase epitaxy of II-VI compounds: A review*. J. Cryst. Growth, 31 (1975), S. 323
- [Har82] H. Hartmann, R. Mach und B. Selle. *Wide gap II-VI compounds as electronic materials*, Band 9 von *Current Topics in Material Science*. North-Holland, Amsterdam, 1982
- [Har87] H. Hartmann, R. Mach und N. Testova. *Vapour phase epitaxy of wide gap II-VI compounds*. J. Cryst. Growth, 84 (1987), S. 199
- [Har95] H. L. Hartnagel, A. L. Dawar, A. K. Jain und C. Jagadish. *Semiconducting transparent thin films*. Institute of Physics Publishing, London, 1995
- [Hen00] I. Hengel. *Ladungsträgertransport und Rekombinationsmechanismen in Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzellen*. Dissertation, Freie Universität Berlin (2000)
- [Her97] R. Herberholz. *Spektroskopie elektrischer Defekte in Heteroübergängen auf der Basis von  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$* . Dissertation, Universität Stuttgart (1997)
- [Her98] R. Herberholz, M. Igalson und H. Schock. *Distinction between bulk and interface states in  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}/\text{ZnO}$  by space charge spectroscopy*. J. Appl. Phys., 83 (1998) (1), S. 318
- [Her99] R. Herberholz, U. Rau, H. W. Schock, T. Haalboom, T. Godecke, F. Ernst, C. Beilharz, K. W. Benz und D. Cahen. *Phase segregation, Cu migration and junction formation in  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$* . European Physical Journal Applied Physics, 6 (1999), S. 131
- [Hes99a] C. Heske, D. Eich, R. Fink, E. Umbach, T. van Buuren, C. Bostedt, L. J. Terminello, S. Kakar, M. M. Grush, T. A. Callcott, F. J. Himpsel, D. L. Ederer, R. C. C. Perera, W. Riedl und F. Karg. *Observation of intermixing at the buried  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  thin film solar cell heterojunction*. Appl. Phys. Lett., 74 (1999) (10), S. 1451
- [Hes99b] C. Heske, D. Eich, R. Fink, E. Umbach, S. Kakar, T. van Buuren, C. Bostedt, L. J. Terminello, M. M. Grush, T. A. Callcot, F. J. Himpsel, D. L. Ederer, R. C. C. Perera, W. Riedl und F. Karg. *Localization of Na impurities at the buried  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$  heterojunction*. Appl. Phys. Lett., 75 (1999) (14), S. 2082

- [Hov69] H. J. Hovel und A. G. Milnes. *The epitaxy of ZnSe on Ge, GaAs, and ZnSe by an HCl close-spaced transport process*. J. Electrochem. Soc., 116 (1969), S. 843
- [JW99] A. Jäger-Waldau, H.-J. Muffler, R. Klenk, M. Kirsch, C. Kelch und M. C. Lux-Steiner. *Gallium doped ZnO for thin film solar cells*. Inst. Phys. Conf. Ser., 162 (1999) (10), S. 565
- [Kan72] K. Kanaya und S. Okayama. J. Phys. D: Appl. Phys., 5 (1972), S. 43
- [K.G97] K. Gartsman, L. Chernyak, V. Jyahovitchaya, D. Cahen, V. Didik, V. Kozlovsky, E. Skoryatina und V. Usacheva. *Direct evidence for diffusion and electromigration of Cu in CuInSe<sub>2</sub>*. J. Appl. Phys., 82(9) (1997), S. 4282
- [Kit80] K. Kitagawa, T. Mishima und K. Takahashi. *Molecular beam epitaxial growth of ZnTe and ZnSe*. J. Electrochem. Soc., 127 (1980) (4), S. 937
- [Kla98] J. Klaer, J. Bruns, R. Henninger, K. Siemer, R. Klenk, K. Ellmer und D. Bräunig. *Efficient CuInS<sub>2</sub> thin-film solar cells prepared by a sequential process*. Semicond. Sci. Technol., 13 (1998), S. 1456
- [Kle94] R. Klenk und H. W. Schock. *Photocurrent collection in thin film solar cells - calculation and characterization for CuGaSe<sub>2</sub>/(Zn,Cd)S*. In Proc. 12<sup>th</sup> E-PSEC. Amsterdam, 1994
- [Kle95] C. R. Kleijn (Hg.). *Chemical Vapor Deposition*. Artech House, Boston, 1995 S. 97–229, S. 97–229
- [Kle00] R. Klenk. *Characterisation and modeling of chalcopyrite solar cells*. In Proc. E-MRS. Straßbourg, France, 2000
- [Klu54] H. P. Klug und L. E. Alexander. *X-ray diffraction procedures*. John Wiley & Sons, Inc., 1954
- [Kna91] O. Knacke, O. Kubaschewski und K. Hesselmann. *Thermochemical properties of inorganic substances*. Springer, New York, 1991
- [Kuh98] S. A. A. Kuhaimi. *The electron affinity difference in CdS/CuInSe<sub>2</sub> solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, (1998), S. 69
- [Kuk90] H. Kukimoto. *Conductivity control of ZnSe grown by MOVPE and its application for blue electroluminescence*. J. Cryst. Growth, 101 (1990), S. 953
- [Lee94] Y. J. Lee und J. L. Gray. *The effects of the band bending caused by interface states in CdTe/CIS solar cells*. In Proc. 1<sup>st</sup> WCPEC. S. 287, Hawaii, 1994
- [Lil84] P. Lilley, M. R. Czerniak und J. E. Nicholls. *Photoluminescence and electrical properties of vapour phase epitaxial ZnSe grown on GaAs*. Phys. Stat. Sol. (a), 85 (1984), S. 235

- [Lin91] D. Lincot und J. Vedel. *Chemical bath deposition of cadmium sulfide thin films*. In *Proc. 10<sup>th</sup> EC-PVSEC*. S. 931, 1991
- [Lok98] C. D. Lokhande, P. S. Patil, H. Tributsch und A. Ennaoui. *ZnSe thin films by chemical bath deposition method*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55 (1998), S. 379
- [LS91] M. C. Lux-Steiner. *Synthese, optoelektronische Eigenschaften und Anwendungen neuer Halbleiterkristalle*. Habilitation, Universität Konstanz (1991)
- [Mad82] O. Madelung (Hg.). *Landolt-Börnstein*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1982
- [Mar95] R. Marquéz und C. Rincón. *On the dielectric constants of  $A^I B^{II} C_2^{VI}$  chalcopyrite semiconductor compounds*. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 191 (1995), S. 115
- [Mas93] G. Massé und K. Djessas. *Close-spaced vapour transport of  $CuInSe_2$ ,  $CuGaSe_2$  and  $Cu(Ga,In)Se_2$* . *Thin Solid Films*, 226 (1993), S. 254
- [Mat90] T. Matsumoto, T. Iijima und H. Goto. *Low pressure VPE of In-doped ZnSe with controlled electrical properties*. *J. Cryst. Growth*, 99 (1990), S. 427
- [Mey56] J. Meyer und E. H. E. Pietsch (Hg.). *Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie*. Verlag Chemie, GmbH, Weinheim, 1956
- [Mey99] T. Meyer. *Reversible Relaxationsphänomene im elektrischen Transport von  $Cu(In,Ga)Se_2$* . Dissertation, Universität Oldenburg (1999)
- [Mey00] N. Meyer, T. Dylla, D. Fischer, M. E. Beck, A. Jäger-Waldau und M. C. Lux-Steiner. *Solar cells based on HCVD grown  $CuGaSe_2$  absorbers with high open circuit voltages*. In *Proc. 16<sup>th</sup> E-PVSEC*. Glasgow, 2000
- [Mih98] T. G. Mihopoulos, S. G. Hummel und K. F. Jensen. *Simulation of flow and growth phenomena in a close-spaced reactor*. *J. Cryst. Growth*, 195 (1998), S. 725
- [Min99] T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura, Y. Hamakawa, T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama und M. Kitagawa. *Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulations*. In *Proc. 11<sup>th</sup> PVSEC*. S. 463, Sapporo, Japan, 1999
- [Min00] T. Minemoto, H. Takakura, Y. Hamakawa, Y. Hashimoto, S. Nishiwaki und T. Negami. *Highly efficient Cd-free  $Cu(In,Ga)Se_2$  solar cells using novel window layer of  $(Zn,Mg)O$  films*. In *Proc. 16<sup>th</sup> E-PVSEC*. Glasgow, 2000
- [Mit76] K. W. Mitchell. *Evaluation of the  $CdS/CdTe$  solar cell*. phd thesis, Stanford University (1976)
- [Mit77] K. W. Mitchell, A. L. Fahrenbruch und R. H. Bube. *Evaluation of the  $CdS/CdTe$  heterojunction solar cell*. *J. Appl. Phys.*, 48 (1977) (10), S. 4365

- [Mül71] R. Müller. *Grundlagen der Halbleiter-Elektronik*. Springer-Verlag, Berlin, 1971
- [Nad98] V. Nadazdy, M. Yakushev, E. H. Djebbar, A. E. Hill und R. D. Tomlinson. *Switching of deep levels in  $\text{CuInSe}_2$  due to electric field-induced Cu ion migration*. J. Appl. Phys., 84 (1998), S. 4322
- [Nak99] T. Nakada und A. Kunioka. *Direct evidence of Cd diffusion into  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  thin films during chemical-bath deposition process of CdS films*. Appl. Phys. Lett., 74 (1999) (17), S. 2444
- [Nak00] T. Nakada und M. Mizutani. *Improved efficiency of  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  thin film solar cells with chemical deposited ZnS buffer layers by air-annealing - formation of homojunction by solid phase diffusion*. In *28<sup>th</sup> IEEE PVSC*. Anchorage, Alaska, 2000
- [Nic65] E. H. Nicollian und A. Goetzberger. *MOS conductance technique for measuring surface state parameters*. Appl. Phys. Lett., 7 (1965), S. 216
- [Nie95] A. Niemegeers, M. Burgelman und A. de Vos. *On the CdS/ $\text{CuInSe}_2$  conduction band discontinuity*. Appl. Phys. Lett., 67 (1995) (6), S. 843
- [Nie96] A. Niemegeers und M. Burgelman. *Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells*. In *Proc. 25<sup>nd</sup> IEEE PVSC*. S. 901, Washington D. C., 1996
- [Nie98] A. Niemegeers, S. Gillis und M. Burgelman. *Interpretation of capacitance spectra in the special case of novel thin film CdTe/CdS and CIGS/CdS solar cell device structures*. In *Proc. 2<sup>nd</sup> WCPEC*. Vienna, Austria, 1998
- [Nii82] T. Niina, T. Minato und K. Yoneda. *Ga-doped ZnSe grown by molecular beam epitaxy for blue light emitting diodes*. Jap. J. Appl. Phys., 21 (1982) (6), S. L378
- [Oht95] Y. Ohtake, K. Kushiya, M. Ichikawa, A. Yamada und M. Konagai. *Polycrystalline  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  thin-film solar cells with ZnSe buffer layers*. Jap. J. Appl. Phys., 34 (1995), S. 5949
- [Oht98] Y. Ohtake, S. Chaisitsak, A. Yamada und M. Konagai. *Characterization of  $\text{ZnIn}_x\text{Se}_y$  thin films as a buffer layer for high efficiency  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  thin-film solar cells*. Jap. J. Appl. Phys., 37 (1998), S. 3220
- [Ols97] L. C. Olsen, W. Lei, F. W. Addis, W. N. Shafarman, M. A. Contreras und K. Ramanathan. *High efficiency CIGS and CIS cells with CVD ZnO buffer layers*. In *Proc. 26<sup>th</sup> IEEE PVSC*. Anaheim, California, 1997
- [Par98] J. Parisi, D. Hilburger, M. Schmitt und U. Rau. *Quantum efficiency and admittance spectroscopy*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 50 (1998), S. 79

- [Pat80] S. V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor & Francis, 1980
- [Paw85] J. M. Pawlikowski. *Preparation and characterization of close-spaced vapour transport thin films of ZnSe for heterojunction solar cells*. Thin Solid Films, 127 (1985), S. 9
- [Per88] G. Perrier, R. Philippe und J. P. Dodelet. *Growth of semiconductors by the close-spaced vapor transport technique: A review*. J. Mater. Res., 3 (1988), S. 1031
- [per00] *Periodensystem der Elemente*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 2000
- [Phi88] J. E. Phillips und M. Roy. *Resistive and photoconductive effects in spectral response measurements*. Proc. IEEE, (1988), S. 1614
- [Phi97] J. E. Phillips, J. Titus und D. Hofmann. *Determining the voltage dependence of the light generated current in CuInSe<sub>2</sub> - based solar cells using I-V measurements made at different light intensities*. In Proc. 26<sup>th</sup> IEEE PVSC. S. 463, Anaheim, California, 1997
- [Pir92] M. Pirzer, M. C. Lux-Steiner und E. Bucher. *Influence of growth conditions on the structural, optical and electrical properties of ZnSe films*. Appl. Phys. A, 54 (1992), S. 455
- [Pro00] M. Prokesch, K. Irmischer, J. Gebauer und R. Krause-Rehberg. *Reversible conductivity control and quantitative identification of compensating defects in ZnSe bulk crystals*. J. Cryst. Growth, 214/215 (2000), S. 988
- [Ram98a] K. Ramanathan, H. Wiesner, S. Asher, D. Niles, J. Keane, M. A. Contreras und R. Noufi. *High efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells without intermediate buffer layers*. In Proc. 2<sup>nd</sup> WCPEC. Vienna, Austria, 1998
- [Ram98b] K. Ramanathan, H. Wiesner, S. Asher, D. Niles, J. Webb, J. Keane und R. Noufi. *A study of the CdS/CuIn(Ga)Se<sub>2</sub> interface in thin film solar cells*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 485 (1998), S. 121
- [Rau97] U. Rau, M. Schmitt, F. Engelhardt, T. Meyer, O. Seifert, J. Parisi, W. Riedl und F. Karg. *Defect spectroscopy and electrical transport properties in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells*. In Proc. 14<sup>th</sup> PVSEC. S. 1238, Barcelona, Spain, 1997
- [Rau99a] U. Rau, D. Braunger, R. Herberholz, H. W. Schock, J.-F. Guillemoles, L. Kronik und D. Cahen. *Oxygenation and air-annealing effects on the electronic properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> films and devices*. J. Appl. Phys., 86 (1999), S. 497
- [Rau99b] U. Rau und H. Schock. *Electronic properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> heterojunction solar cells - recent achievements, current understanding, and future challenges*. Appl. Phys. A, 69 (1999), S. 131

- [Rho88] E. H. Rhoderick und R. H. Williams. *Metal-semiconductor contacts*. Clarendon Press, Oxford, 1988
- [Rho92] E. H. Rhoderick, W. R. Frensley und M. P. Shaw. *Device Physics*, Band 4. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1992
- [Rib66] A. R. Riben und D. L. Feucht. *Electrical transport in nGe-pGaAs heterojunctions*. Int. J. Electronics, (1966), S. 583
- [Rot78] A. Rothwarf, J. Phillips und N. C. Wyeth. *Junction field and recombination phenomena in the CdS/Cu<sub>2</sub>S solar cell: Theory and experiment*. In *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE PVSEC*. S. 399, 1978
- [Rum00] A. Rumberg, C. Sommerhalter, M. Toplak, A. Jäger-Waldau und M. C. Lux-Steiner. *ZnSe thin films grown by chemical vapour deposition for application as buffer layer in CIGSS solar cells*. Thin Solid Films, 361-362 (2000), S. 172
- [Saa96] M. Saad, H. Riazi, E. Bucher und M. Lux-Steiner. *CuGaSe<sub>2</sub> solar cells with 9.7 % power conversion efficiency*. Appl. Phys. A, 62 (1996), S. 181
- [Sch18] P. Scherrer. *Nachr. Göttinger Gesell.*, 98 (1918)
- [Sch95] M. Schmitt, U. Rau und J. Parisi. *Investigation of deep trap levels in CuInSe<sub>2</sub> solar cells by temperature dependent admittance measurements*. In *Proc. 13<sup>th</sup> E-PVSEC*. S. 1969, Nice, France, 1995
- [Sch96] D. Schmid, M. Ruckh und H. W. Schock. *A comprehensive characterization of the interfaces in Mo/CIS/CdS/ZnO solar cell structures*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 41/42 (1996), S. 281
- [Sch99] E. Schönherr und M. Freiberg. *In situ observation of twin formation during the growth of ZnSe single crystals from the vapour phase*. J. Cryst. Growth, 197 (1999), S. 455
- [Shi96] T. Shioda, S. Chichibu, T. Irie, H. Nakanishi und T. Kariya. *Influence of nonstoichiometry on the Urbach's tails of absorption spectra for CuInSe<sub>2</sub> single crystals*. J. Appl. Phys., 80 (1996) (2), S. 1106
- [Sho49] W. Shockley. *The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors*. Bell Syst. Tech. J., 28 (1949), S. 435
- [Sho52] W. Shockley und W. T. Read. *Statistics of the recombination of holes and electrons*. Phys. Rev., 87 (1952), S. 835
- [Sic96] D. Siche, H. Hartmann, K. Böttcher und E. Krause. *Growth of bulk ZnSe crystals - recent developments*. Phys. Stat. Sol. (b), 194 (1996), S. 101
- [Sir63] E. Sirtl. *Die Sandwich-Methode - Ein neues Verfahren zur Herstellung epitaktisch gewachsener Halbleiterschichten*. J. Phys. Chem. Solids, 24 (1963), S. 1285

- [Stü89] N. Stücheli. *Hochleitende p-ZnSe Epitaxieschichten: Herstellung, Charakterisierung und Anwendung als blau elektrolumineszierende Bauelemente*. Dissertation, Universität Konstanz (1989)
- [Ste96] O. Stenzel. *Das Dünnschichtspektrum*. Akademie Verlag GmbH, 1996
- [Su98] C.-H. Su, W. Palosz, S. Feth und S. Lehoczky. *Heat treatments of ZnSe starting materials for physical vapor transport*. J. Cryst. Growth, 192 (1998), S. 386
- [Sug00] T. Sugiyama, S. Chaisitsak, A. Yamada, M. Y.Kudriavtsev, A. Godines, A. Villegas und R. Asomoza. *Formation of pn homojunction in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells by Zn doping*. Jap. J. Appl. Phys., 39 (2000), S. 4816
- [Sze81] S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, New York, 1981
- [Tel77] B. Tell und P. M. Bridenbaugh. *Photovoltaic properties and junction formation in CuInSe<sub>2</sub>*. J. Appl. Phys., 48 (1977) (6), S. 2477
- [Tho67] D. G. Thomas. *II-VI Semiconducting Compounds*. Benjamin Publ.Co., New York, 1967
- [Tob99] S. Tober. *Herstellung und Charakterisierung von Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis von CuGaSe<sub>2</sub> und CuInSe<sub>2</sub>*. Diplomarbeit, Freie Universität Berlin (1999)
- [Top97] M. Topič, F. Smole und J. Furlan. *Examination of blocking current-voltage behaviour through defect chalkopyrite layer in ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>/Mo solar cell*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 49 (1997), S. 311
- [Tut95] J. R. Tuttle, J. R. Sites, A. Delahoy, W. Shafarman, B. Basol, S. Fonash, J. Gray, R. Menner, J. Phillips, A. Rockett, J. Scofield, F. R. Shapiro, P. Singh, V. Suntharalingam, D. Tarrant, T. Walter, S. Wiedeman und T. M. Peterson. *Characterization and modeling of Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub>-based photovoltaic devices: A laboratory and industrial perspective*. Progress in Photovoltaics, 3 (1995), S. 89
- [Urb53] F. Urbach. Phys. Rev., 92 (1953), S. 1324
- [US84] M. Umar-Syed und P. Lilley. *The growth and photoluminescence of ZnSe on GaAs by VPE in the temperature range 300-500 °C*. J. Cryst. Growth, 66 (1984), S. 21
- [Vög92] M. Vögt. *Herstellung und Charakterisierung von Heterosolarzellen auf der Basis von WSe<sub>2</sub>-Einkristallen*. Dissertation, Universität Konstanz (1992)
- [Wad98] T. Wada, S. Hayashi, Y. Hashimoto, S. Nishiwaki, T. Sato, T. Negami und M. Nishitani. *High efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with improved CIGS surface*. In Proc. 2<sup>nd</sup> WCPEC. S. 403, Vienna, Austria, 1998

- [Wal94] T. Walter. *Herstellung und optoelektronische Charakterisierung polykristalliner I-III-VI<sub>2</sub>-Verbindungshalbleiter und darauf basierender Heteroübergänge für Dünnschichtsolarzellen*. Dissertation, Universität Stuttgart (1994)
- [Wal96a] T. Walter, R. Herberholz, C. Müller und H. Schock. *Defect distribution and metastability in chalcopyrite semiconductors*. In *Mat. Res. Soc.*. San Francisco, 1996
- [Wal96b] T. Walter, R. Herberholz, C. Müller und H. Schock. *Determination of defect distributions from admittance measurements and application to Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> based heterojunctions*. *J. Appl. Phys.*, 80 (1996) (8), S. 4411
- [Wal96c] T. Walter, R. Herberholz und H. W. Schock. *Distribution and defects in polycrystalline chalcopyrite thin films*. *Solid State Phenomena*, 51-52 (1996), S. 309
- [War69] B. E. Warren. *X-Ray Diffraction Spectroscopy*. Addison-Wesley Publishing, London, 1969
- [Wei99] S.-H. Wei, S. B. Zhang und A. Zunger. *Effects of Na on the electrical and structural properties of CuInSe<sub>2</sub>*. *J. Appl. Phys.*, 85 (1999) (10), S. 7214
- [Yam98] A. Yamada, S. Chaisitsak, Y. Ohtake und M. Konagai. *High efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells with novel ZnIn<sub>x</sub>Se<sub>y</sub> buffer layer*. In *Proc. 2<sup>nd</sup> WCPEC*. Vienna, Austria, 1998
- [Yos88] A. Yoshikawa, H. Nomura, S. Yamaga und H. Kasai. *Electrical and photoluminescence properties of iodine-doped ZnSe films grown by low-pressure MOVPE*. *Jap. J. Appl. Phys.*, 27 (1988), S. L1948
- [Yos97] H. Yoshikawa und S. Adachi. *Optical constants of ZnO*. *Jap. J. Appl. Phys.*, 36 (1997) (10), S. 6237



# Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge

Teile der vorliegenden Arbeit sind bereits veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung angenommen:

- A. Rumberg, Ch. Sommerhalter, M. Toplak, A. Jäger-Waldau, und M. Ch. Lux-Steiner, *ZnSe thin films grown by chemical vapour deposition for application as buffer layer in CIGSS solar cells*, Thin Solid Films 361-362 (2000), S. 172-176
- A. Rumberg, A. Gerhard, S. Lindner, A. Jäger-Waldau, und M. Ch. Lux-Steiner, *ZnSe buffer prepared by iodine enhanced chemical vapour deposition for CIGSS based solar cells*, 12<sup>th</sup> PVSEC, Cheju, Korea, Juni 2001, Vortrag

Weitere Veröffentlichungen:

- I. Gavilanes Pérez, A. Rumberg, und R. Scheer, *Charge carrier collection of chalcopyrite solar cells at grain boundaries and buried junctions*, 16<sup>th</sup> E-PVSEC, Glasgow, 2000, Vortrag
- A. Rumberg, Ch. Sommerhalter, M. Toplak, A. Jäger-Waldau, und M. Ch. Lux-Steiner, *ZnSe thin films grown by chemical vapour deposition for application as buffer layer in CIGSS solar cells*, E-MRS, Straßbourg, France, Juni 1999, Poster

Vortrag:

- A. Rumberg, Ch. Sommerhalter, A. Jäger-Waldau, und M. Ch. Lux-Steiner, *Chemische Gasphasendeposition von ZnSe-Pufferschichten in Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>-Solarzellen*, DPG-Frühjahrstagung, Münster, März 1999, Vortrag



# Lebenslauf

Anne Rumberg

15. Juni 1971	geboren in Berlin
09/77 – 07/83	Grundschule
09/83 – 06/90	Gymnasium
06/90	Abitur
10/90 – 03/97	Studium der Physik, Technische Universität Berlin
07/92	Vordiplom
03/94 – 03/95	Studienarbeit, University of Technology, Sydney
06/95 – 09/96	Diplomarbeit, Institut für Festkörperphysik, Berlin, Prof. W. Richter
03/97	Diplom
seit 04/98	Wissenschaftliche Angestellte, Hahn–Meitner–Insitut, Berlin, Prof. M. Ch. Lux–Steiner



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir bei dem Entstehen der Arbeit geholfen haben - auf vielfältige Weise.

Allen voran meiner Professorin Frau Lux-Steiner, die mit ihrem beispiellosen Enthusiasmus und Engagement für die Solarenergie die Grundlage für diese Arbeit geschaffen hat.

Herrn Prof. Richter für die Übernahme des Zweitgutachtens - und das, obwohl keinerlei *in-situ* Diagnostiken verwendet wurden.

Arnulf Jäger-Waldau für meine Betreuung und die Organisation des Projektes.

Wolfgang Fritsch für die Einführung in CFD-Welt und die nachhaltige, immer freundliche Unterstützung bis zum Zusammenschreiben der Ergebnisse.

Reiner Klenk, dem schlaunen Fuchs, für die vielen Nebensätze, die mir sehr geholfen haben.

Sebastian Fiechter und Yvonne Tomm sowie Herrn Siche vom Institut für Kristallzüchtung für die hilfreichen Diskussionen über kleine und grosse Kristalle.

Susanne Siebentritt, Steffen Schuler und Wolfgang Eisele für die gewissenhafte Durchsicht des Manuskripts.

Michael Kirsch, Carola Kelch, Jörg Beckmann, Tim Münchenberg, Jürgen Albert und Bernd Mertesacker für viele Dinge... Substratpräparationen, Messungen, Wartung der Anlage, Bändigung von Computern... (auch wenn ZnSe sonst doch besser als CdS gewesen wäre)

Ina Sieber für die schönsten aller REM-Bilder, Peter Schubert-Bischoff für die fachmännische TEM-Präparation und Ulrike Bloeck für die TEM-Messungen.

Andreas Gerhard für die kompetente Einweisung in die Admittanzspektroskopie und das immer offene Ohr bei all den Fragen und Problemen, die auftraten.

Nikolaus Meyer (eigentlich ja Niko), Imke Hengel, Ulrich Fiedeler, Alex Meeder und David Fuertes dafür, dass die Zeit an meinem Schreibtisch superschön war (ausser mal bei 30 °C und Sonne).

Daniel, der Schuld dran ist... *nüsch*... und für go girl go.

Tilman für die nötige Kopfwäsche, Katja für die Kampfbegleitung, Thorsten für all die schönen Zeichnungen (wo sind die eigentlich?), Swen für seine Hilfsbereitschaft und nochmal Steffen nicht nur für die Kürbissuppe.

Bernd, der mich wirklich beeindruckt und mir sehr sehr geholfen hat, Per, der weiß, was wichtig ist (BlumenBierPizzaPhotoglossKaffeeundgroßeAutos), Jens für die Hundebilder aus Neuseeland, Sigrid weil du Sigrid bist, für die ständige Unterstützung und all die sexy Klammotten...

Jan für ... alles

Hab ich jemanden vergessen? hüüühüü brrrrrr

