

Kapitel 2

Chalkopyritdünnschichtsolarzellen

In diesem Kapitel soll der Aufbau und die Herstellung der hier verwendeten Chalkopyritdünnschichtsolarzellen beschrieben werden. Anhand des Banddiagramms des Bauelements werden wichtige Eigenschaften der Solarzelle und Funktionen der Pufferschicht diskutiert. Die Eigenschaften des Absorbermaterials und Einflüsse auf dessen Dotierung durch Natriumzugabe, Variation des Schwefel- und Galliumgehalts und Diffusionsprozesse von Elementen aus der Pufferschicht werden am Schluß des Kapitels besprochen.

2.1 Aufbau von $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Solarzellen

Chalkopyritdünnschichtsolarzellen werden im allgemeinen auf einem Glassubstrat abgeschieden (Abbildung 2.1). Daneben werden auch flexible Materialien wie z.B. Metallfolien verwendet [Kes01]. Als Substrat für die in dieser Arbeit benutzten Solarzellen dient 2 mm dickes Natron-Kalk-Glas. Um die unkontrollierte Diffusion von Natrium aus dem Glas in das Absorbermaterial zu verhindern, wird eine Diffusionsbarriere bestehend aus Al_2O_3 aufgebracht [Pro01b]. Darauf wird ein ungefähr 500 nm dicker Molybdän-Rückkontakt gesputtert, auf den eine dünne Na-haltige Schicht bestehend aus NaF bzw. NaSe [Rau99c] folgt, die eine kontrollierte Dotierung des Chalkopyritabsorbers ermöglicht.

Die Herstellung des Absorbers verläuft in zwei Prozeßschritten: Zuerst wird CuGa und In auf die Na-haltige Schicht aufgesputtert und anschließend Se aufgedampft. Im zweiten Schritt wird diese Vorläuferschicht unter Schwefel-Atmosphäre mit einer hohen Heizrate (engl.: rapid thermal process (RTP)) auf eine Temperatur von 550°C aufgeheizt. Dabei entsteht $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ (CIGSS). Die Dicke des Absorbers beläuft sich durchschnittlich auf ca. $1.8 \mu\text{m}$.

Auf den Absorber wird eine Pufferschicht abgeschieden. Dieser Depositionsschritt wird in dieser Arbeit in einem naßchemischen Bad durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung dieses Prozesses erfolgt im nächsten Kapitel (Kapitel 3), da die Untersuchung der Pufferschicht die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist. Die Dicke der aufgewachsenen Pufferschicht beträgt im Fall von $\text{Zn}(\text{Se,OH})$ 10 - 20 nm (Kapitel 6.2) und für CdS 50 nm (Kapitel 6.1).

Darauf folgt eine ZnO-Schicht, die in zwei Stufen aufgebracht wird. Zunächst wird eine

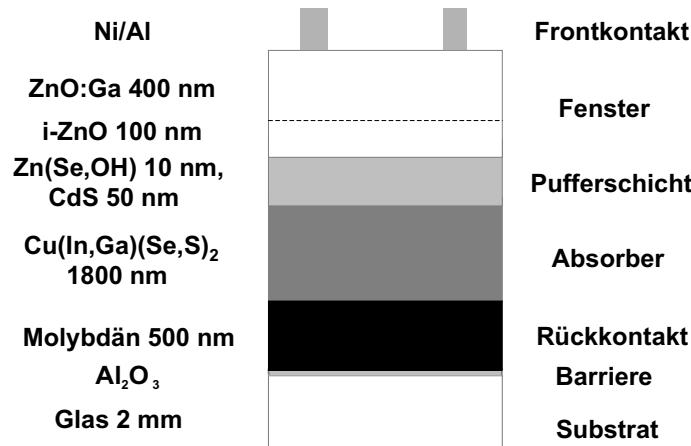


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus einer Dünnschichtsolarzelle auf der Basis von $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$

'intrinsische' i-ZnO-Schicht mit einer Dicke von 100 nm aufgesputtert. Aufgrund von Sauerstoff-Fehlstellen beläuft sich die Höhe der intrinsischen Dotierung jedoch auf eine Größenordnung von $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ [Ruc96]. Trotzdem hat sich der Name intrinsisch in der Literatur durchgesetzt, um diese Schicht von der nachfolgend aufgebracht hochdotierten ZnO:Ga-Schicht zu unterscheiden. Diese Schicht weist eine Dicke von durchschnittlich ca. 400 nm auf. Deren Dotierung liegt im Bereich von $N_D = 10^{20} \text{cm}^{-3}$ [JW99].

Zur Kontaktierung wird ein Ni/Al-Gitter aufgedampft, dessen Lichtabschattung zwischen 5 % und 10 % beträgt.

Das in dieser Arbeit verwendete Absorbermaterial wurde von Shell-Solar auf Glas/Mo bereitgestellt. Es wird in einem hochskalierten, industriellen Fertigungsprozeß hergestellt, bei dem die Gesamtzusammensetzung des Absorbers mit Hilfe von Röntgen-Fluoreszenz-Messungen überwacht wird. Die Schwefelwerte können dabei in einem Bereich von $\pm 10\%$ und das Verhältnis $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ in einem Bereich von $\pm 1.5\%$ eingestellt werden [Ste00]. Das Absorbermaterial weist jedoch kein homogenes Tiefenprofil der Elemente auf (Kapitel 5.2). Ga findet sich vor allem am Rückkontakt der Absorberschicht [Pro01a]. Eine detaillierte Beschreibung des Herstellungsprozesses findet sich in [Kar01, Ste00, Pro01b].

Die Größe der von Shell-Solar gelieferten Absorberschichten betrug zunächst $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Sie wurden in kleinere Substrate unterteilt, die eine Abmessung von $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ hatten. Zur Charakterisierung der Substrate im Labormaßstab wurden Kontaktfinger für 8 Solarzellen aufgedampft und somit Solarzellen mit einer Gesamtfläche (engl.: total area) von 0.5 cm^2 hergestellt.

2.2 Banddiagramm einer Solarzelle auf der Basis von $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$

Anhand des Aufbaus der Chalkopyritdünnschichtsolarzelle läßt sich nun das Banddiagramm ableiten. Abbildung 2.2 zeigt das Banddiagramm einer Solarzelle auf der Basis von CIGSS.

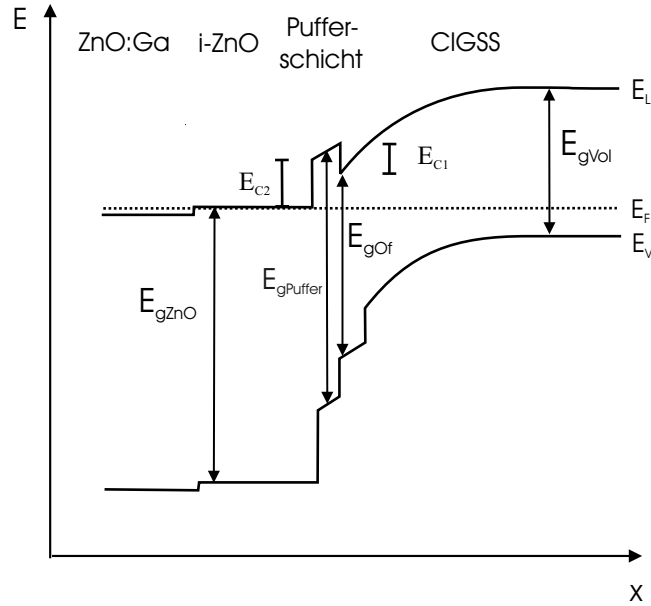


Abbildung 2.2: Schematisches Banddiagramm einer CIGSS-Solarzelle. E_{gOf} bezeichnet die Bandlücke des Absorbers an der Oberfläche, die größer sein kann als die Bandlücke des Absorbers im Volumen E_{gVol} . E_{gZnO} bzw. $E_{gPuffer}$ sind die Bandlücken des ZnO-Fensters bzw. der jeweiligen Pufferschicht. ΔE_{C1} bezeichnet den Leitungsbandversatz zwischen Oberfläche des Absorbers und Pufferschicht, ΔE_{C2} zwischen Pufferschicht und i-ZnO.

Da die verwendeten Materialien in Chalkopyrit-Heterostrukturen verschiedene Bandlücken und Elektronenaffinitäten besitzen, kommt es an den Grenzflächen zu einem Versatz im Valenz- bzw. Leitungsband. Die Banddiskontinuitäten gehen in späteren Kapiteln teilweise in Simulationen der Solarzelle ein und sind z.B. für den Ladungsträgertransport wichtig. Deshalb sollen sie hier kurz vorgestellt werden. In Tabelle 2.1 sind einige Literaturangaben aufgelistet. Für eine umfassende Übersicht sei auf den Artikel von Rau verwiesen [Rau99c].

Beim Erstellen des Banddiagramms wird davon ausgegangen, daß an den Grenzflächen ein abrupter Übergang besteht. Zunächst werden die jeweiligen Leitungsbanddiskontinuitäten für CdS als Pufferschicht vorgestellt.

Für die Leitungsbanddiskontinuität zwischen i-ZnO und CdS gibt es relativ wenige Literaturangaben. Die ermittelten Werte liegen zwischen $\Delta E_{C2} = -0.4$ eV und -0.2 eV (Tabelle 2.1). Zur Bestimmung der Banddiskontinuität zwischen der CdS-Pufferschicht und der Oberfläche des Absorbers gibt es dagegen zahlreiche Untersuchungen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß an der Oberfläche des Absorbers eine größere Bandlücke als im Absorbervolumen beobachtet werden kann. Diese größere Bandlücke kann zum einen durch eine sog. 'ordered vacancy compound (OVC)' bedingt sein, wobei angenommen wird, daß es sich um eine $CuIn_3Se_5$ -Phase handelt. Zum anderen kann die Bandlücke aufgrund einer veränderten Zusammensetzung des Absorbers an der Oberfläche größer sein, z.B. durch einen höheren Schwefelgehalt. Die aufgeweitete Bandlücke an der Absorberoberfläche wird in dieser Arbeit mit $CISS_{Of}$ bezeichnet.

Schmid et al. [Sch93] sowie Okano et al. [Oka98] beobachteten anhand von Messungen mittels Photoelektronenspektroskopie (PES) an der Oberfläche eines $CuInSe_2$ -Absorbers eine OVC

Tabelle 2.1: Leitungsbanddiskontinuitäten ΔE_C für verschiedene Übergänge zwischen zwei Halbleitern (HL 1 und HL 2) mit den jeweiligen Bandlücken E_g . Für das Vorzeichen gilt folgende Konvention: Ist das Leitungsband an einer Grenzfläche zu größeren Tiefen x höher (s. Abbildung 2.2), so ist das Vorzeichen negativ. Vermerkt ist außerdem, ob es sich um eine Messung (Exp.) oder um eine Berechnung (Theo.) der Diskontinuität handelt.

HL 1, E_g (eV)	HL 2, E_g (eV)	ΔE_C (eV)	Ref.
ZnO, 3.3	CdS, 2.4	- 0.4	Exp. [Ruc94]
ZnO, 3.4	CdS, 2.4	- 0.2	Theo. [Nie98b, Rau01a]
CdS, 2.4	OVC (CuIn_3Se_5), 1.3	0.3	Exp. [Sch93, Ruc96, Oka98]
OVC (CuIn_3Se_5), 1.3	CuInSe_2 , 1.04	-0.02	Exp. [Ruc96]
CdS, 2.2	CISS_{Of} , 1.4	0	Exp. [Mor01]
ZnSe, 2.67	CuInSe_2 , 1.04	0.9 eV	Theo. [Nel93, Wei93]
ZnSe, 2.67	CuInSe_2 , 1.04	1.2 eV	Theo., Exp. [Woe98]
ZnSe, 2.9	CuInSe_2 , 1.03	1.2 eV	Exp. [Lok98, Enn00]

mit einer Bandlücke von 1.3 eV. Für die Grenzfläche OVC/CdS wurden für die Leitungsbanddiskontinuität Werte von $\Delta E_{C1} = 0.3$ eV ermittelt [Ruc96, Oka98]. Zwischen der OVC und dem Absorbervolumen wurde ein Leitungsbandversatz von - 0.02 eV gemessen [Ruc96]. Dieser Wert ist so klein, daß er vernachlässigt werden kann. Die Diskontinuität zwischen OVC und Absorbervolumen, die durch die größere Bandlücke der OVC bedingt ist, macht sich somit in einem Valenzbandversatz bemerkbar (Abbildung 2.2).

Heske et al. [Hes99] kommen anhand von Untersuchungen mittels PES und inverser PES zu dem Schluß, daß die Vorstellung einer abrupten Grenzfläche zwischen Pufferschicht und Absorber aufgegeben werden muß. Es findet vielmehr eine Durchmischung verschiedener Elemente statt. Durch die Eindiffusion von Cd in den Absorber und das Herausdiffundieren von In und Se in die Pufferschicht entsteht eine kontinuierlich abgestufte Bandlücke. Für die Bandlücke von CBD-CdS wurde ein Wert von 2.2 eV ermittelt (Tabelle 2.1) [Mor01]. Morkel und Weinhardt et al. [Mor01, Wei01] fanden darüberhinaus in ihren Messungen mittels PES und inverser PES eine Oberflächenbandlücke des Absorbers von 1.4 eV, wobei der dort untersuchte Absorbertyp dem in dieser Arbeit verwendeten entspricht. Ein Leitungsbandversatz an der Grenzfläche zwischen CdS-Pufferschicht und Absorber konnte nicht festgestellt werden.

Für ZnSe als Pufferschichtmaterial existieren keine Literaturangaben zur Leitungsbanddiskontinuität zwischen ZnSe und ZnO. Die Bandlücke von ZnSe wird mit Werten von 2.67 eV

bis 2.9 eV angegeben (Tabelle 2.1). Für die Grenzfläche ZnSe/CuInSe₂ ergibt sich ein Leitungsbandversatz zwischen $\Delta E_{C1} = 0.9$ eV und 1.2 eV (Tabelle 2.1). Dabei enthielten die in den Untersuchungen verwendeten Absorberschichten jedoch keine höhere Oberflächenbandlücke.

Bei der Verwendung insbesondere von ZnSe als Pufferschicht stellt sich anhand der hohen gemessenen Leitungsbanddiskontinuitäten die Frage nach dem Ladungsträgertransport. Hohe positive Diskontinuitäten im Leitungsband $\Delta E_{C1} \geq 0.4$ eV stellen eine Barriere für den Ladungstransport der photogenerierten Elektronen in der Solarzelle dar [Rau99c]. Ein Teil der Elektronen müßte dann durch die gesamte Pufferschicht tunneln. Daß der Ladungstransport jedoch nicht durch direkte Tunnelprozesse durch die gesamte Pufferschicht beschrieben werden kann, machen folgende Überlegungen deutlich: Die Dicke von ZnSe-Pufferschichten in Solarzellen wird mit 10 nm bis zu 140 nm angegeben [Enn00, Eng99], wobei die Stromdichten sich mit zunehmender Dicke nicht wesentlich unterscheiden. Schon mit einer Dicke von 10 nm und einem Leitungsbandversatz von 1 eV ergibt sich mit einer effektiven Masse für ZnSe von $m_e^* \approx 0.15$ [Hoe85] und der Annahme einer Rechteckbarriere eine verschwindend kleine Tunnelwahrscheinlichkeit in der Größenordnung e^{-30} [Sze81]. Eine größere Pufferschichtdicke verringert die Tunnelwahrscheinlichkeit weiter. Der Beitrag von Tunnelmechanismen, die ein direktes Tunneln durch die gesamte Pufferschicht beinhalten, kann also keinen wesentlichen Anteil am Zustandekommen des Gesamtstroms in Chalkopyritsolarzellen mit ZnSe-Pufferschichten haben. Es wird daher vermutet, daß die gemessenen Leitungsbanddiskontinuitäten ΔE_C in der Solarzelle so nicht vorliegen, sondern geringer sind bzw. andere Mechanismen für den Ladungsträgertransport existieren, wie z.B. störstellenunterstütztes Tunneln, das in CdS-Pufferschichten für tiefe Temperaturen gefunden wurde [Sch00].

An dieser Stelle sollen nun die Effekte, die in Zusammenhang mit der Pufferschicht in Chalkopyritsolarzellen diskutiert werden, vorgestellt werden. Der Grenzfläche des Absorbers kommt in Chalkopyritsolarzellen eine entscheidende Bedeutung zu. Hier können Rekombinationsprozesse stattfinden, die die Leerlaufspannung und damit den Wirkungsgrad der Solarzelle limitieren (s. ausführliche Diskussion in Kapitel 8.1.2). Die Rekombination ist besonders effektiv, wenn das Fermi-niveau in der Mitte der Bandlücke liegt (dann gilt $n = p$) und dort gleichzeitig eine hohe Defektdichte vorhanden ist, wie es an der Grenzfläche üblicherweise der Fall ist. Um die Rekombination zu unterdrücken, gibt es im wesentlichen zwei Möglichkeiten: Die Defektdichte wird verringert und/oder der Ort $n = p$ muß in einen Bereich niedriger Defektdichte verschoben werden. Eine Pufferschicht, die auf die Absorberoberfläche aufgebracht wird, kann unter anderem diese Aufgaben erfüllen. Ihre genaue Rolle ist jedoch nicht vollständig verstanden. Folgende Funktionen der Pufferschicht werden diskutiert:

- **Oberflächenzustände:** Die Absorberoberfläche wird durch die Pufferabscheidung modifiziert. Die an der Oberfläche existierende Oxidschicht wird durch das chemische Bad entfernt und eine positive Oberflächenladung bzw. donatorische Grenzflächenzustände aufgebracht [Kro00, Kle01]. Dadurch kann die Bandverbiegung im Absorber verstärkt und eine

Inversion der Grenzfläche bewirkt werden. Inversion im Fall eines p-dotierten Absorbers bedeutet, daß das Fermi-niveau an der Grenzfläche an das Leitungsband geschoben wird. Dadurch wird der Ort $n = p$ von der Grenzfläche weg in das Volumen des Absorbers verlegt, wo eine wesentlich geringere Defektdichte vorherrscht. Rekombinationsverluste werden dadurch verringert.

- Diffusionsprozesse: Eine Eindiffusion von Zn oder Cd in den Absorber kann zu einer n-Dotierung der Oberfläche führen und dadurch das Entstehen eines vergrabenen Übergangs bewirken [Ram98, Wad98, Lia02]. Von einem vergrabenen Übergang wird im Unterschied zur Inversion der Grenzfläche gesprochen, wenn eine Typumwandlung der Oberfläche eines Halbleiters z.B. von p nach n durch das Einbringen von Dotanden erzeugt wird und dadurch der p-n-Übergang von der Grenzfläche weg in das Volumen des Materials verschoben wird. Bei der Grenzflächeninversion dagegen erfolgt keine Dotierung, sondern hier kann durch das Aufbringen von Oberflächenzuständen eine Verschiebung des Fermi-niveaus in Richtung des Leitungsbandes erfolgen.

Wie oben schon angesprochen, kann es zu Mischphasen an der Grenzfläche Pufferschicht/Absorber kommen, wodurch die Vorstellung einer abrupten Grenzfläche aufgegeben werden muß und eine abgestufte Bandlücke entsteht [Hes99].

- Bandanpassung: Ohne Pufferschicht tritt zwischen ZnO und dem Chalkopyritabsorber ein negativer Versatz ΔE_{C1} im Leitungsband auf (sog. cliff). Dadurch wird eine Inversion der Absorbergrenzfläche herabgesetzt und ein Pfad für die Rekombination geöffnet [Kle01]. Durch eine Pufferschicht kann ein positiver Versatz (sog. spike) im Leitungsband entstehen, der die Inversion verstärkt [Kle01] und bei einer Höhe bis 0.4 eV keine Barriere für den Elektronentransport darstellt [Rau99c].
- Schutz des Absorbers vor Sputterschäden: Das ZnO-Fenster wird durch Sputtern aufgebracht, wobei Defekte durch die auftreffenden Teilchen entstehen können. Eine deckende Pufferschicht kann mögliche Schäden an der Absorberoberfläche verhindern.
- Gitteranpassung: Materialien wie ZnSe oder CdS besitzen mit einer Gitterkonstanten von $a = 5.67 \text{ \AA}$ bzw. 5.82 \AA eine bessere Gitteranpassung zum Chalkopyrit-Absorber als ZnO mit einer Gitterkonstanten von $a = 4.63 \text{ \AA}$. Dadurch werden Grenzflächenzustände durch Gitterfehlpassungen reduziert.

Diese Fragestellungen, die im Zusammenhang mit der Rolle der Pufferschicht diskutiert werden, stellten die wesentliche Motivation für diese Arbeit dar. In den nachfolgenden Kapiteln werden deshalb die Eigenschaften von Zn(Se,OH)-Pufferschichten in Chalkopyritsolarzellen untersucht und der Frage der Bedeutung und Funktionsweise der Pufferschicht nachgegangen.

2.3 Eigenschaften des Chalkopyritabsorbermaterials

Das hier verwendete Absorbermaterial besitzt eine Chalkopyritstruktur. Chalkopyrite sind ternäre Verbindungshalbleiter vom Typ I-III-VI₂. Abbildung 2.3 zeigt die Struktur der Chalko-

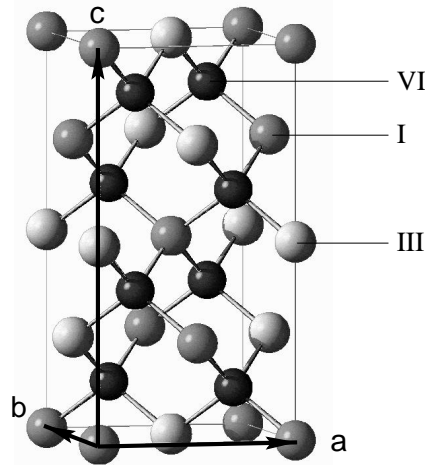


Abbildung 2.3: Einheitszelle der Chalkopyritstruktur. In Richtung der c -Achse entspricht sie einer verdoppelten Zinkblendestructur mit zwei verschiedenen Metallionen.

pyriteinheitszelle.

Chalkopyrite besitzen eine direkte Bandlücke und einen hohen Absorptionskoeffizienten in einem Bereich von $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ bis $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [Neu82, Tut89]. Dadurch kann die Dicke der Absorberschicht auf 2 - 3 μm begrenzt werden, was im Vergleich zu herkömmlichen Siliziumsolarzellen eine Materialreduktion um den Faktor 100 bedeutet.

Ein weiteres Argument für die Verwendung von Chalkopyriten in Solarzellen ist die Möglichkeit der kontinuierlichen Variation der Bandlücke durch die Substitution des metallischen Kations und/oder des Chalkogenanions mit Elementen aus der gleichen Gruppe. Wird z.B. Se durch S oder In durch Ga ersetzt, so kann die Bandlücke von 1.0 eV (CuInSe_2) bis auf 2.5 eV (CuGaS_2) erhöht werden (Abbildung 2.4). Dabei ändert sich auch die Gitterkonstante des Chalkopyriten. Für CuInSe_2 betragen $a = b = 5.78 \text{ \AA}$ und $c = 11.6 \text{ \AA}$ [Bör82]. Mit der Zugabe von Ga oder S ist eine Verringerung der Gitterkonstante verbunden. Bei Verwendung von ZnSe als Pufferschicht wird durch Ga-, bzw. S-Zugabe zum Chalkopyriten die Anpassung des Absorbers an das ZnSe-Gitter verbessert (Abbildung 2.4). Die in dieser Arbeit verwendeten Absorberschichten bestehen aus den fünf Elementen Cu, In, Ga, S und Se. Das Tiefenprofil dieser Elemente ist jedoch nicht homogen (Kapitel 5.2), was eine Variation der Bandlücke innerhalb des Absorbers zur Folge hat.

Die Dotierung in Chalkopyritabsorbern wird hauptsächlich durch intrinsische Defekte verursacht. Die verwendeten Absorberschichten sind p-leitend. Für die p-Dotierung wird ein flacher Akzeptor verantwortlich gemacht [Rau99c], der einer Cu-Vakanz zugeordnet wird. Ein weiterer, in Chalkopyritsolarzellen oft beobachteter Defekt liegt ca. 300 meV von der Valenzbandkante entfernt [Rau99c]. Die chemische Zuordnung dieser tiefen Störstelle ist nicht eindeutig. Es kommen dafür unter anderem Defektkomplexe oder Indium auf einem Cu-Platz in Frage [Rau99c]. In den hier verwendeten Absorberschichten mit einem Schwefelanteil von ungefähr 10 Atomprozent wurde nur eine geringe Dichte tiefer Störstellen gefunden, wobei die Rolle des Schwefels als entscheidend für die Passivierung tiefer Störstellen gesehen wird

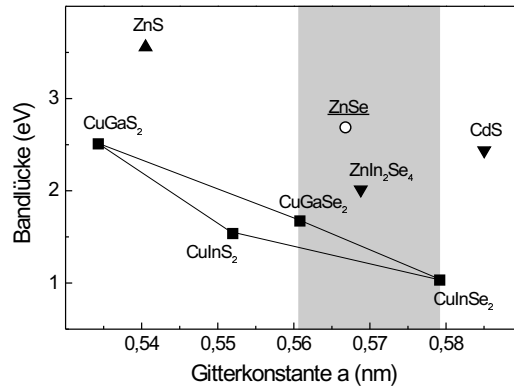


Abbildung 2.4: Veränderung der Gitterkonstanten und der Bandlücke bei Substitution des Kations bzw. des Anions in CuInSe_2 .

[Rau98b]. Die Rekombination findet dann über flache Störstellen statt und ist damit weniger effektiv (Kapitel 8.1.2). Eine tabellarische Übersicht der berechneten und gemessenen Defekte für Chalkopyritsolarzellen ist in einem Übersichtsartikel von Rau zu finden [Rau99c].

Eine extrinsische Dotierung von Chalkopyritschichten ist aufgrund der hohen Selbstkompensation des Materials schwierig [Sch01]. Selbstkompensation bedeutet die Generation von kompensierenden intrinsischen Defekten bei Zugabe von Dotierelementen. Durch das Aufbringen einer Pufferschicht wird jedoch vermutet, daß durch die Eindiffusion von Zn bzw. Cd eine Typumwandlung der Absorberoberfläche von p nach n stattfindet [Ram98, Wad98, Lia02]. Cd und Zn bilden auf Cu-Gitterplätzen Donatoren. Dadurch entsteht im CIGSS-Absorber ein vergrabener Übergang (s. auch Kapitel 8.1.4). Ein solcher Übergang konnte schon 1975 in CuInSe_2 -Kristallen durch Implantation von Cd- und Zn-Ionen nachgewiesen werden [Yu75, Yu76].

Zugabe von Na während des Wachstumsprozesses des Absorbers hat einen großen Einfluß auf die Struktur und die elektrischen Eigenschaften des Materials. Es wird angenommen, daß Na akzeptorische Zustände erzeugt und es so zu einer zusätzlichen Dotierung kommt [Rau98b, Nil99]. Darüberhinaus verbessert Na die Morphologie der Schichten [Roc00]. Ein weiterer Aspekt wurde von Kronik et al. beobachtet. Na hat demzufolge einen katalytischen Effekt auf die Oxidation und Passivierung von Korngrenzen im polykristallinen Absorbermaterial. Dadurch wird die Transportbarriere für Elektronen über die Korngrenzen reduziert [Kro00].

Aus diesem Kapitel wird ersichtlich, daß Chalkopyritdünnschichtsolarzellen ein komplexes System darstellen. Trotz dieser Komplexität und der damit verbundenen Schwierigkeit einer modellhaften Beschreibung lassen sich reproduzierbar hohe Wirkungsgrade erreichen und diese Solarzellen zeigen darüberhinaus erstaunliche Toleranzen hinsichtlich Variation der Komposition und Verunreinigungen.