

## 2 **ION LAYER GAS REACTION –ILGAR, ein alternatives Depositionsverfahren für dünne Beschichtungen**

*In der Dünnschichttechnologie werden je nach Funktion und Qualitätsanforderung der Schichten und unter Berücksichtigung der Kosten verschiedenartige Depositionstechniken benutzt. Im folgenden sollen die Vor- und Nachteile verschiedener Verfahren erörtert werden; die Schwierigkeiten der meisten Methoden beim Beschichten von rauhen, vor allem aber von hoch porösen Substraten führte zur Entwicklung des ILGAR-Verfahrens, dessen Grundprinzip in diesem Kapitel vorgestellt wird.*

### 2.1 **Depositionsmethoden für Verbindungen in der Dünnschichttechnologie**

Die gängigsten trockenchemischen Beschichtungsmethoden für Verbindungen wie die Verfahren PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition), MOCVD (Metal Organic Chemical Vapour Deposition), die Sputtertechnik und MBE (Molecular Beam Epitaxy) [ 6 ] kommen hauptsächlich in den Gebieten zum Einsatz, in denen sehr hohe Qualitätsanforderungen an Morphologie, Stöchiometrie und Kristallinität bestehen. Die Notwendigkeit von Hochvakuum oder sogar Ultrahochvakuum, hohe Prozeßtemperaturen und bisweilen sehr kleine Depositionsraten machen die Verfahren kostenintensiv; zwar ist die Abscheidung auf glatten Substraten sehr homogen, bei rauhen oder sogar porösen Oberflächen können bei derartigen Depositionsmethoden jedoch Abschattungseffekte auftreten, so daß Teile des Substrates unbeschichtet bleiben. Zudem ist die Zerstörungsfreiheit für das Substrat nicht immer gewährleistet und eine großflächige Abscheidung führt zu erheblichen technologischen Herausforderungen.

Kostengünstige Alternativen hierzu sind naßchemische Depositionsmethoden. Hier kann auf Vakuum und hohe Prozeßtemperaturen

verzichtet werden und zudem ist kein großer apparativer Aufwand erforderlich. Das naßchemische Beschichten kann in einem oder mehreren Prozeßschritten erfolgen. So findet z.B bei der CBD-Methode (Chemical Bath Deposition) der gesamte Prozeß in nur einem Abscheidebad statt; die Anion- und Kationenspendenden Verbindungen sind darin gelöst. Typischerweise liegen die Metallionen komplexiert vor, während die Anionen erst bei Temperaturerhöhung freigesetzt werden. In der Folge bildet sich das gewünschte, schwerlösliche Endprodukt auf der z. T. katalytisch wirkenden Substratoberfläche. Die Reaktion kann jedoch auch innerhalb der Lösung stattfinden; dies führt zur Agglomeration von Clustern und Kristalliten und wird schließlich als Trübung des Bades sichtbar. Diese Agglomerate, welche sich ebenfalls auf dem Substrat anlagern können, beeinträchtigen jedoch die Homogenität und die physikalischen Eigenschaften des abgeschiedenen Films. Da die Reaktion über Temperatur und pH-Wert aktiviert wird, führen schon kleine Schwankungen in diesen Prozeßparametern zu einem möglicherweise unerwünschtem Reaktionsablauf, was direkten Einfluß auf die Schichteigenschaften hat [ 5 ]. Auch die Dicke der Beschichtung, welche über die Konzentration und das Stoffmengenverhältnis der Ausgangssubstanzen, sowie über die Abscheidezeit einzustellen ist, wird durch Schwankungen beeinflusst.

Neben den chemisch-physikalischen Schwierigkeiten ist die Methode der Badabscheidung von technologischer Seite her problematisch. Ihre Automatisierung und Integration in einen häufig verwandten Fließbandprozeß, bei dem die Substrate horizontal transportiert werden, ist schwierig. Da im CBD-Verfahren ein Eintauchen des Substrates in das Bad notwendig ist, stellt es beim horizontalen Transport einen Abbruch des Fließbandprozesses dar. Zusätzlich macht die geringe Materialausnutzung des Bades, welche unter 10 % liegt [ 7 ], das CBD-Verfahren gerade bei Verwendung von Schwermetall- und anderen toxischen Verbindungen ökologisch noch ungünstiger.

Ein neueres sequentielles, naß-chemisches Herstellungsverfahren, ist die SILAR-Methode (Successive Ion Layer Adsorption Reaction) [ 8 ]. Hierbei wird über eine erste Abscheidung das Kation des erwünschten Endprodukts als feste Verbindung auf das Substrat aufgebracht. In einem zweiten Bad, in dem das Anion des Endprodukts in gelöster Form vorliegt, kommt es zur Reaktion, also zur Umwandlung des Kationenfilms zum gewünschten Endprodukt. Die Schichtdicke des abgeschiedenen Dünnsfilms wird durch Wiederholen dieser beiden Prozeßschritte eingestellt. Um einen vollständigen Reaktionsumsatz zu erreichen, was für die Abscheidung homogener Schichten erstrebenswert ist, darf die im ersten Bad aufgebraute Schicht nicht allzu dick sein.

Das Verfahren verringert die Ausbildung von Agglomeraten auf dem zu beschichtenden Substrat und weist zudem eine höhere Materialausnutzung auf; wiederum ist es aber, da es Abscheidetäder benutzt, nur bedingt in einen Fließbandprozeß integrierbar. Die Abscheidung einer homogenen Beschichtung auf einem feinporigen Substrat ist beim SILAR-Verfahren ebenfalls nur bedingt gewährleistet. Die erste Ausgangslösung kann bei sehr porösen Substraten über starke Kapillarkräfte auch in sehr enge Poren eindringen; da jedoch im darauf folgenden

zweiten Bad die Reaktion der Edukte vom Porenäußeren in Richtung Poreninneres verläuft, somit dann auch der Poreneingang rasch eingengt wird, ist bei einem solchen Verfahren mit einem flüssigen Reagenz ein komplettes Beschichten der Porenwände nicht garantiert.

## 2.2 ILGAR-Verfahren

### 2.2.1 Funktionsprinzip

Gerade die Zielsetzung einer kompletten Beschichtung von Porenwänden gab am Hahn-Meitner-Institut den Ausschlag für die Entwicklung eines neuen Abscheidungsverfahrens.

Bei dem hier vorzustellenden ILGAR-Verfahren [ E2-E10 ] wird zunächst in einem ersten Schritt eine Verbindung auf dem Substrat abgeschieden, die das Kation des Endproduktes enthält. Typischerweise handelt es sich hierbei um ein Metallsalz. Um Abschattungseffekte auf rauhen oder sogar porösen Substraten während der Deposition zu vermeiden, sind diese Salze wie beim SILAR-Verfahren in einem nicht-wäßrigen Lösungsmittel gelöst. Durch Eintauchen und Herausziehen des Substrates aus der Lösung (dip-Verfahren) oder durch Aufsprühen der Lösung wird das Metallsalz auf die Probe aufgebracht. In einem zweiten Prozeßschritt (Abbildung 1) trocknet der Metallsalzfilm in

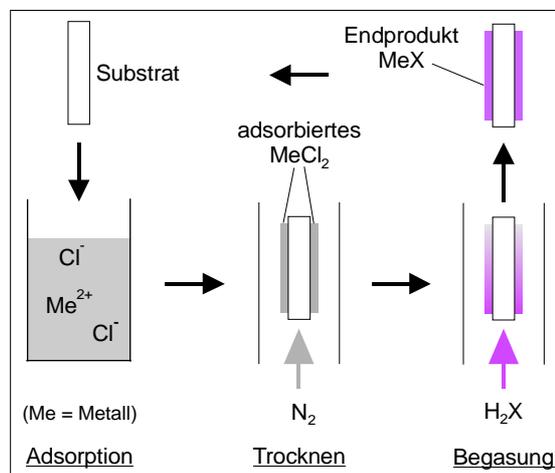


Abbildung 1: Die Prozessschritte des ILGAR-Verfahrens.

einem Inertgasstrom. Allerdings kann dieser Schritt bei glatten Substraten und beim Verwenden rasch verdampfender Lösungsmittel entfallen, da hier schon im ersten Prozeßschritt, während des Herausziehens des Substrates aus der Lösung, das Metallsalz als trockene und feste dünne Schicht (ion layer) vorliegt. Hierdurch können auch die speziell auf glatten Substraten auftretenden Entzunderungseffekte umgangen werden. In einem letzten Prozeß- und dem eigentlichen Reaktionsschritt wird das Ausgangssalz mit einem das Anion des Endproduktes liefernden Reaktantgas begast und zum gewünschten Endprodukt umgewandelt. Es handelt sich also nicht, wie beim SILAR-Verfahren um eine Reaktion im flüssigen Medium [ 8 ], sondern um eine Reaktion zwischen Feststoff und Gas (gas reaction). Wie SILAR ist ILGAR ein sequentielles Verfahren, was ebenfalls eine vollständige Materialausnutzung ermöglicht, jedoch das Ausbilden von Agglomeraten völlig vermeidet. Als zyklisches Verfahren wird die Schichtdicke über die Zahl der Wiederholungen der Prozeßschritte eingestellt. Da das Edukt, welches das Anion liefert, im Gegensatz zum SILAR gasförmig ist, findet die Reaktion selbst noch in stark verengten Poren statt. Das Verwenden eines Reaktantgases ermöglicht deshalb ein Aufbringen relativ dicker Metallsalzsichten je Prozeßzyklus, da hier im Gegensatz zum SILAR ein Gas tief eindringen kann, so daß nicht nur wenige Atomlagen zum Endprodukt umgewandelt werden. Die Auftragungsrate je Prozeßzyklus beträgt daher beim ILGAR mehrere Nanometer [ E4 ]. Der pH-Wert, welcher beim CBD-Verfahren ein kritischer Prozeßparameter ist, spielt beim ILGAR-Verfahren keine entscheidende Rolle, da die Reaktion nicht in der Lösung stattfindet. Lediglich die Prozeßtemperatur und die Konzentration der Ausgangsstoffe in der Lösung haben wesentlichen Einfluß auf die physikalischen Eigenschaften der hergestellten Dünnschichten. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit, ein Gemisch aus Kationen in der Ausgangslösung und/ oder

ein Gasgemisch, somit ein Gemisch aus Anionen zu verwenden, ohne den Reaktionsablauf negativ zu beeinflussen. Auf einfache Art und Weise können daher dünne Schichten, bestehend aus Verbindungsgemischen, aber auch aus multinären und dotierten Verbindungshalbleitern hergestellt werden. Das Verfahren bietet also die Möglichkeit, direkt auf die optischen und elektrischen Eigenschaften der abgeschiedenen Dünnschichten Einfluß zu nehmen. Die einzige Bedingung an das Reaktionsprodukt besteht darin, daß es wegen des zyklischen Verlaufs des Herstellungsprozesses in der Ausgangslösung unlöslich sein muß. Da dies bei geeigneter Wahl des Lösungsmittels für sehr viele Verbindungen der Fall ist, eröffnet sich ein weites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten, die in Kapitel 4 noch näher erläutert werden.

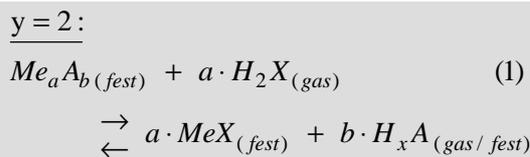
Eine Automatisierung ist beim ILGAR leicht realisierbar; am Hahn-Meitner-Institut wurde ein Roboter mit über Servomotoren betriebenen Achsen der Firma ISEL-Automation entwickelt. Dieser ermöglicht das Bewegen des senkrecht eingespannten Substrates in alle drei Raumrichtungen. Der Antrieb mit Servomotoren gewährleistet zudem ein gleichmäßiges Herausziehen des Substrates aus der Precursorlösung, was eine wichtige Voraussetzung für die Schichthomogenität darstellt. Das Begasen der Metallsalzsicht wird über Elektroventile gesteuert.

Neben diesem sogenannten dip-Verfahren ist bei Verwendung von Metallbändern oder Kunststoffolie als Substrate aber auch ein „roll-to-roll“-Verfahren denkbar, welches das Band abwechselnd in Bäder und Begasungskammern führt. Eine unmittelbare Integrierung des ILGAR-Verfahrens in einen Fließbandprozeß ist ebenfalls möglich, wenn anstelle des „dippens“ die Precursorflüssigkeit auf das Substrat aufgesprüht wird. Hierdurch wird der horizontale Transport des Substrates durch den flüssigen Prozeßschritt nicht unterbrochen.

Alle diese Varianten des ILGAR-Verfahrens sind über Patente abgesichert [Pat.1-Pat.3].

### 2.2.2 Chemische Reaktionsprozesse für II–VI-Halbleiterschichten

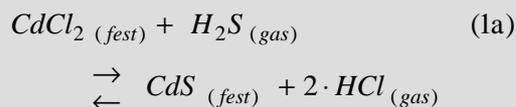
Die im ersten Prozeßschritt benutzte Precursorlösung besteht aus einem rasch verdampfenden Lösungsmittel, vorzugsweise Acetonitril oder Tetrahydrofuran (THF). In diesen Lösungsmitteln sind viele Metallsalze, besonders die hier verwendeten Metallchloride  $[\text{MeCl}_y]$ ,  $\text{Me} = \text{Metall}$ ] oder Metallperchlorate  $[\text{Me}(\text{ClO}_4)_y]$  leicht löslich (die Wertigkeit des Metallkations ist im Falle der II–VI-Halbleiter  $y=2$ ). Je nach Wahl des Reaktantgases wird das Ausgangsmaterial in fester Form zum gewünschten Reaktionsprodukt umgewandelt. So führen z.B. die gasförmigen Chalkogenwasserstoffe  $\text{H}_2\text{X}$  [ $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ] bei der ILGAR-Reaktion zu den entsprechenden II–VI-Chalkogenidverbindungen  $\text{MeX}$ , d. h. zu Sulfiden, Seleniden bzw. Telluriden. Eine Ausnahme stellt der Chalkogenwasserstoff  $\text{H}_2\text{O}$  dar, der in Abschnitt 2.2.4 gesondert betrachtet wird. Es habe das Anion A des Ausgangssalzes die Wertigkeit x:



mit :

$$b = \frac{2a}{x}; \quad a = \begin{cases} x & \forall x \text{ ungerade} \\ \frac{x}{2} & \forall x \text{ gerade} \end{cases}$$

Beispiel:



Die Reaktion (1) ist vom chemischen Standpunkt aus keine Redoxreaktion; vielmehr handelt es sich um einen einfachen Ionenaustausch zwischen den Edukten. Die hergestellten Metallchalkogenide sind in der Ausgangslösung schwerlöslich und chemisch

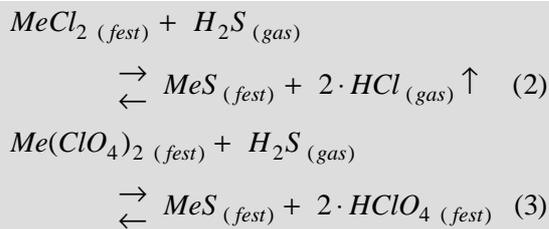
stabil. Bei Verwendung von Metallchloriden ist das Nebenprodukt der Reaktion (Gleichung (1a)) gasförmiges HCl, welches aus der abgeschiedenen Beschichtung leicht entweicht. Benutzt man bei dieser Reaktion anstelle des Chlorids ein Metallperchlorat, so ist das Reaktionsnebenprodukt flüssige Perchlorsäure ( $\text{HClO}_4$ ). Diese wird im folgenden Ausgangsbad bzw. in einem zusätzlichen Spülschritt leicht aus dem Dünnfilm herausgewaschen oder verdampft oberhalb einer Prozeßtemperatur von  $198^\circ\text{C}$  [9] aus der Schicht. Die Wahl des Ausgangssalzes entscheidet somit darüber, wie leicht das unerwünschte Nebenprodukt der ILGAR-Reaktion aus der abgeschiedenen Schicht zu entfernen ist.

Prinzipiell können auch III–V-Verbindungshalbleiter über das ILGAR-Verfahren hergestellt werden; so wäre eine Reaktion zwischen einem dreiwertigen Salz wie  $\text{GaCl}_3$  oder  $\text{InCl}_3$  mit Arsenwasserstoff ( $\text{AsH}_3$ ) oder Phosphorwasserstoff ( $\text{PH}_3$ ) zu Galliumarsenid ( $\text{GaAs}$ ) und Indiumphosphid ( $\text{InP}$ ) vom thermodynamischen Standpunkt aus möglich. Letztere Gase sind aber wie die Chalkogenwasserstoffe  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$  und  $\text{H}_2\text{Te}$  hoch toxisch; Versuche zur Herstellung von Selenid-Tellurid- und III–V-Verbindungen über das ILGAR-Verfahren wurden daher aus Sicherheitsgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

### 2.2.3 Die Deposition von Sulfidverbindungen

Zielsetzung der ersten Entwicklungsphase von ILGAR war die Herstellung dünner Sulfidschichten, wobei die erste erfolgreiche Durchführung des ILGAR-Prozesses mit der Abscheidung einer Cadmiumsulfid ( $\text{CdS}$ )-Schicht gelang. Hierbei wurde nach Gleichung (1a) eine auf das Substrat aufgebrachte Cadmiumchlorid ( $\text{CdCl}_2$ )-Dünnschicht mit Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) zu  $\text{CdS}$  umgewandelt. Die allgemeinen Reaktionen von Metallchlorid bzw. Metallperchlorat (Wertig-

keit des Kations sei 2) zum entsprechenden Sulfid werden durch die Gleichungen (2) bzw. (3) beschrieben:



Da beide Nebenprodukte unter geschickt gewählten Prozeßbedingungen leicht aus der abgeschiedenen Schicht entweichen, sind die in der Beschichtung zurückbleibenden Chlorreste auf nicht-umgesetztes Ausgangsmaterial zurückzuführen (Kapitel 4.1.2). Das überschüssige Reaktantgas H<sub>2</sub>S wird nach dem Begasungsschritt im ILGAR-Prozess in Natronlauge gepumpt, wo es zu Natriumsulfid reagiert und somit neutralisiert und absorbiert wird. Durch den Neutralisierungsprozeß kann das ILGAR-Verfahren zur Herstellung von Sulfidschichten als ökologisch unbedenklich eingestuft werden.

#### 2.2.4 Die Deposition von Oxidverbindungen

Der ILGAR-Oxidabscheidung [Pat.1, E6, E8, E10] stellt bei der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Reaktion mit Chalkogenwasserstoffen eine Ausnahme dar. Hierbei handelt es sich um eine Modifikation des eigentlichen ILGAR-Verfahrens, an deren Entwicklung ich entscheidend mitwirkte und welche wegen

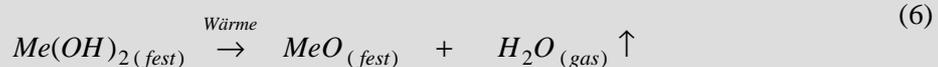
ihrer speziellen Prozeßführung gesondert patentrechtlich geschützt wurde [ Pat.1, Pat.2 ].

Sauerstoff gehört wie Schwefel, Selen und Tellur zu den Elementen der sechsten Hauptgruppe, den Chalkogenen; die Verbindungen mit Wasserstoff werden entsprechend Chalkogenwasserstoffe genannt. Bei Verwendung von Schwefelwasserstoff, Selenwasserstoff und Tellurwasserstoff führt die Reaktion direkt zu den entsprechenden Chalkogenidverbindungen, also den Metallsulfiden, -seleniden und -telluriden. Anders verhalten sich Metallsalze (in unserem Fall Chloride und Perchlorate) gegenüber Wasser: nur ein drei- und höherwertiges Metallion geht eine Reaktion mit Wasser ein (auch Hydrolyse genannt). Bei ein- und zweiwertigen Metallionen reicht die Gleichgewichtskonzentration an OH<sup>-</sup>-Ionen im Wassers zur Bildung von Metallhydroxiden nicht aus. Erst eine Erhöhung der OH<sup>-</sup>-Konzentration ins Alkalische führt zur erwünschten Bildung von Hydroxiden, die leicht über Wärmezufuhr zu den Oxiden dehydratisiert werden können.

Bei der Entwicklung des ILGAR-Oxid-Verfahren ergab sich folgende Schwierigkeit: Wie kann bei Gebrauch von gasförmigem H<sub>2</sub>O die OH<sup>-</sup>-Konzentration zur Metallhydroxidbildung ausreichend erhöht werden? Die erfinderische Leistung bestand u.a. darin, neben dem Wasser ein zweites Reaktantgas bei der Probenbegasung anzubieten, so daß nach der Adsorption beider Gase auf dem Metallsalz basische Bedingungen herrschen.



A = Precursoranion, hier Cl<sup>-</sup> oder (ClO<sub>4</sub>)<sup>-</sup>; Wertigkeit des Metallkations (Me) = 2



Technisch realisiert ist dies über ein Reaktantgasgemisch aus Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Wasser. Sind beide Gase auf der aufgetragenen Metallsalzschrift adsorbiert, so werden gemäß der Reaktionsgleichung (4)  $\text{OH}^-$ -Ionen gebildet, die anschließend nach Gleichung (5) eine Reaktion mit dem Ausgangssalz zum Hydroxid eingehen; das Hydroxid wird daraufhin unter Zufuhr von Wärme in das entsprechende Oxid überführt (Dehydratation, Gleichung (6)). Beide Reaktionen, Hydroxid-

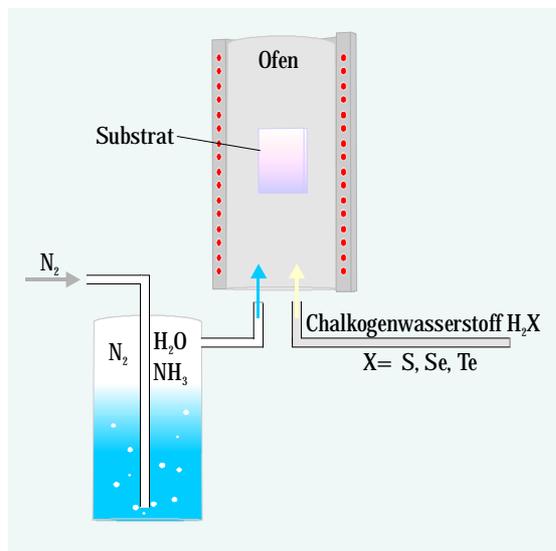


Abbildung 2: Aufbau der Gasreaktionskammer im ILGAR-Verfahren.

bildung und Dehydratation werden in einem einzigen Prozeßschritt ausgeführt. Dabei befindet sich die Probe in einem Ofen, in dem das Reaktantgasgemisch eingeleitet wird (Abbildung 2). Das Gasgemisch wird auf einfache Weise beim Durchleiten von inertem Trägergas wie  $\text{N}_2$  durch wäßrige Ammoniaklösung erzeugt.

Beides, das Benutzen eines Trägergases und die Kombination einer Reaktions- und Heizkammer, untersteht ebenfalls dem patentrechtlichen Schutz [Pat.1, Pat.2]. Die Wahl des Ammoniaks als zweites Reaktantgas erweist sich als vorteilhaft in Bezug auf die entstehenden Reaktionsnebenprodukte. Bei den benutzten Metallchloriden bzw. -perchloraten entstehen gemäß Gleichung (5) neben dem gewünschten Metallhydroxid, Ammoniumchlorid ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) und Ammoniumperchlorat

( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ). Diese Ammoniumverbindungen sind zwar Feststoffe, sublimieren und/oder zersetzen sich aber schon oberhalb einer Temperatur von  $150\text{ }^\circ\text{C}$  [10]. Zerfallsprodukte sind  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  und  $\text{HCl}$ . Je nach Prozeßtemperatur variieren sie in ihrem Verhältnis zueinander. Zudem sind die Nebenprodukte sehr gut in Wasser löslich, so daß durch einen zusätzlichen, wäßrigen Spülschritt innerhalb des Abscheideprozesses chlorfreie Oxidfilme herstellbar sind.

### 2.2.5 Deposition von Hydroxid- Oxid-Sulfidgemischen

Eine spezielle Prozeßführung erfordert die Herstellung von Pufferschichten für Chalkopyrit-Dünnschichtsolarzellen (siehe auch Anhang AIII). Wie noch gezeigt wird, führt eine ILGAR-Sulfid-Pufferschicht, die in ihrer Zusammensetzung der einer über CBD abgeschiedenen ähnelt, zur besten Effizienz der Solarzelle (Kapitel 5.4). Neben einem Metallsulfid besteht in diesem Fall die abgeschiedene Schicht aus dem entsprechenden Metallhydroxid und -oxid. Die Kombination aus ILGAR-Sulfid- und ILGAR-Oxid-Abscheidung ermöglicht die Herstellung solcher Verbindungsgemische. Dazu wird, wie in Abbildung 2 dargestellt, nach der Hydroxidbildung dieses nur teilweise dehydratisiert und in einem zusätzlichen Sulfurisierungsschritt anschließend ein Teil des noch vorhandenen Hydroxids zum entsprechenden Metallsulfid umgewandelt. Es wird daher eine vollständige Reaktion des Metallsalzes zum Hydroxid angestrebt; der Dehydratationsprozeß und die Sulfurisierung verläuft gezielt unvollständig. Der Oxidgehalt wird über die Dehydratationsdauer eingestellt, d.h. die Zeit, welche die Probe im Ofen verbleibt. Er wird auch über die Dehydratations-Geschwindigkeit in Form der gewählten Ofentemperatur reguliert. Der Metallsulfidgehalt wird ebenfalls über die Begasungsdauer eingestellt, wobei hier wegen der großen Reaktivität des  $\text{H}_2\text{S}$  darauf verzichtet wird, dieses Gas bei jedem ILGAR-Zyklus einzuleiten. Vielmehr schließt für eine

optimale Pufferabscheidung nur jeder dritte Zyklus einen Sulfurisierungsschritt mit ein; diese Prozeßführung hat zur Folge, daß eine unvollständige Reaktion vorliegt und Hydroxid in der Schicht verbleibt.

Der große Vorteil des ILGAR-Verfahrens gegenüber dem chemischen Bad besteht in der einfacheren Einstellung der Schichtzusammensetzung. Beim CBD kann der Hydroxid- und Oxidgehalt nur über den pH-Wert des Bades

und dem Gehalt an Ausgangssalz, welches den Schwefel liefert, eingestellt werden. Da dieser kritische Prozeßparameter aber direkt Einfluß auf die Abscheidung selbst hat, wird mit dessen Variation auch Schichtmorphologie, Schichtdicke und Kristallitgröße verändert. Diese Schichteigenschaften spielen eine entscheidende Rolle für die Effizienz der herzustellenden Solarzelle.

### 2.3 Zusammenfassung des Kapitels

*Eine Vielzahl von Schwierigkeiten bei der Dünnschicht-Abscheidung von Verbindungen auf hoch-porösen Substraten, welche herkömmliche Depositionstechniken mit sich bringen, führte zur Entwicklung eines neuartigen Abscheideverfahrens, der Ion Layer Gas Reaction. Die hier dargestellte, prinzipielle Funktionsweise läßt schon die unaufwendige und einfache Prozeßführung und ihr großes Anwendungspotential erkennen. In diesem Kapitel exemplarisch erörterte, chemische Reaktionen zeigen die Vielfalt der mit ILGAR abgeschiedenen Verbindungen auf. Die Weiterentwicklung des ursprünglich für Sulfide erfundenen Verfahrens [Pat.3], mit welchem jetzt neben den II-VI-Halbleitern auch multinäre und dotierte Schichten hergestellt werden können, führte schließlich zur Erteilung eines zweiten Patentes, das die spezielle Prozeßführung bei der Deposition von Oxid-Schichten umfaßt [ Pat.1 ]. Auch eine Deposition von Verbindungsgemischen und damit im speziellen von Hydroxid-Oxid-Sulfid-Gemischen wurde erarbeitet, so daß jetzt, wie in Kapitel 5.4 gezeigt wird, Pufferschichten für hocheffiziente Dünnschichtsolarzellen über ILGAR herzustellen sind.*

