

3 MAGNETRONSPUTTERN

3.1 DAS PLASMA

Plasmagestützte Abscheidemethoden finden heute breite Anwendung in industriellen Beschichtungsprozessen. Ein wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit der Schichtherstellung bei niedrigeren Substrattemperaturen als bei rein thermischen Prozessen. Seit den frühen 1970er Jahren werden sie auch in der Mikroelektronik erfolgreich verwendet. Diese Methode beruht auf der Erzeugung eines Plasmas, meist aus Edelgasen, zwischen zwei Elektroden bei Drücken im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-1} mbar. Das Plasma "brennt" zwischen den Elektroden, solange eine Kettenreaktion von Gasionisationen die Entladung aufrecht erhält. Es ist elektrisch leitfähig aber quasineutral, weil Kationen und Elektronen in gleichen Konzentrationen vorliegen. Wegen der außergewöhnlichen Eigenschaften von Plasmen werden sie auch als der "vierte Aggregatzustand" bezeichnet^[99]. Die Initialzündung eines Plasmas erfolgt durch einen elektrischen Zündfunken oder ein Ionisationsereignis durch ein hochenergetisches Teilchen eines natürlichen radioaktiven Zerfallprozesses oder der kosmischen Strahlung. Die im Plasma enthaltenen hochenergetischen Teilchen bombardieren je nach Versuchsanordnung entweder eine der Elektroden oder auch eine entsprechend angeordnete Probe. Dieser Teilchenbeschuß kann sowohl zum Abtragen einer Schicht (z.B. für die Erstellung von Tiefenprofilen der chemischen Zusammensetzung) oder zum Beschichten von Substraten ausgenutzt werden.

3.2 ZERSTÄUBEN (SPUTTERN)

Das Elektrodenmaterial wird durch das Bombardement mit positiven Ionen abgetragen oder "zerstäubt" (engl. sputtern), weshalb die Methode auch als "Kathodenzerstäubung" bezeichnet wird. Die hier interessierende Anordnung nutzt den Kathodenabtrag, um gegenüber der Kathode eine dünne Schicht der gewünschten Zusammensetzung auf ein dort positioniertes Substrat abzuscheiden. Für die Kathode ist die aus dem Englischen entnommene Bezeichnung "Target" in der Abscheidetechnik weit verbreitet.

Da der Sputtervorgang im wesentlichen ein Stoßprozeß ist - ein Edelgasion trifft auf ein Targetatom - gilt nach dem Impulserhaltungssatz, daß die Wahl des Edelgases, mit dem gesputtert wird, die Effizienz des Sputterprozesses bestimmt. Für die Kombinationen Edelgas/Molybdän ($M \approx 96 \text{ g/mol}$) wäre demnach Krypton ($M \approx 84 \text{ g/mol}$) für die Kombination Edelgas/Wolfram ($M \approx 184 \text{ g/mol}$) sogar das radioaktive Radon ($M \approx 222 \text{ g/mol}$) das geeignetste Sputtergas. Da Argon als übliches Laborgas aber wesentlich preiswerter als die genannten schwereren Edelgase ist, wird meist Argon als Sputtergas verwendet.

Die Ausbeute beim Zerstäuben eines Targets durch Ionen wurde für unterschiedliche Kombinationen aus Targetmaterial und Ionensorte in Abhängigkeit von der Ionenenergie untersucht. Aus Molybdän wie aus Wolfram kann ein Ar-Ion mit 500 eV Energie zwischen 0,5 und 0,6 Atome herausschlagen^[100]. Diese Sputterausbeute ist eine gute Näherung für die durchgeführten Experimente, da die in der vorliegenden Untersuchung typische Entladespannung um etwa 500 V lag und das Plasmapotential in der Nähe (einige Volt) des Massepotentials lag.

Die Sputterausbeute S bzw. Abtragsrate hängt neben der Kombination aus Targetmaterial und Edelgas auch von der Energie E_{Ion} und vom Auftreffwinkel des bombardierenden Ions ab. Die Energieabhängigkeit verläuft nach (3.1)^[101] linear oberhalb einer Mindestenergie E_{min} . Die Mindestenergie des Ions für den Beginn des Sputterprozesses kann nach (3.2)^[102] berechnet werden.

$$S = \text{konst} (E_{\text{Ion}} - E_{\text{min}}) = \text{konst} e (U_{\text{p}} - U_{\text{DC}} - U_{\text{min}}) \quad (3.1)$$

U_{p} , U_{DC} und U_{min} sind Plasmapotential, Entladespannung, und das der Mindestenergie entsprechende Potential, e die Elementarladung des Elektrons.

$$E_{\text{min}} = 8 E_0 \left(\frac{M_{\text{Ion}}}{M_{\text{FK}}} \right)^{2/5} \quad (3.2)$$

E_0 ist die Oberflächenenergie des Targetmaterials und M_{Ion} bzw. M_{FK} sind die molaren Massen von Ionen und Targetmaterial.

3.3 MAGNETRONSPUTTERN

Es sind verschiedene Anordnungen für das Sputtern entwickelt worden. Neben der Dioden- und der Triodenanordnung ist vor etwa 30 Jahren eine neue Sputteranordnung, das Magnetronsputtern, erfunden worden, das sich rasch als industrielle Abscheidemethode durchsetzte. In einer planaren Magnetronanordnung ist das Substrat in der Regel gegenüber der Kathode positioniert. Ringförmig hinter einer kreisförmigen Kathode angebrachte Permanentmagneten zwingen durch ihr Magnetfeld zusammen mit dem elektrischen Feld der Elektrodenanordnung das Plasma in einen ring- oder torusförmigen Raum nahe des Targets. Die Elektronen bewegen sich auf Zykloidenbahnen, die parallel zur Kathode verlaufen, und haben so eine hohe Effizienz für die Stoßionisation. Der ringförmige Bereich des Ortes der höchsten Plasmadichte führt auch zu einer ringförmigen Abtragung des Targetmaterials (Erosionsgraben, s. Abb. 3.1).

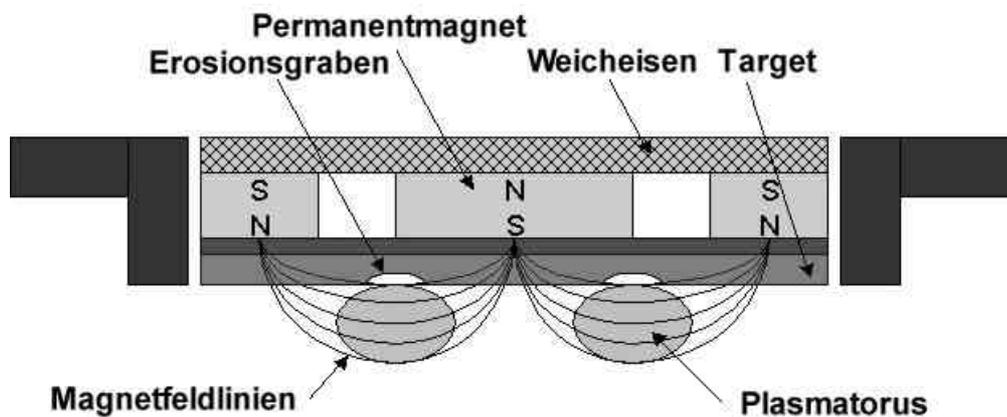


Abb. 3.1: Prinzipskizze einer planaren Magnetronsputterquelle. Das Plasma wird durch das Magnetfeld von ringförmig angeordneten Permanentmagneten nahe am Target in eine Torusform gezwungen, die sich auch in der Bildung des Erosionsgrabens widerspiegelt. (nach ^[103])

Die Methode bietet gegenüber Abscheidemethoden wie dem thermischen Verdampfen, der chemischen Gasphasenabscheidung oder der Sprühpyrolyse den Vorteil geringerer Abscheidetemperaturen, guter Schichthaftung auf dem Substrat, der Möglichkeit hoher Abscheideraten bis $12 \mu\text{m min}^{-1}$, gleichmäßige Schichtdickenverteilung, hoher Dichten, guter Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität der Abscheidebedingungen, die Realisierbarkeit für eine breite Klasse von Verbindungen und Legierungen, relativer Preisgünstigkeit und Skalierbarkeit für große Flächen (bis zu $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$)^[35]. Gegenüber anderen Plasmatechniken sind außerdem geringere Drücke ausreichend, was die Kosten durch einen geringeren Gasverbrauch senkt.

Folgende Prozeßparameter beeinflussen die chemische Zusammensetzung und/oder die strukturellen Eigenschaften von gesputterten Schichten^[104]:

- Sputtergasdruck
- Substrattemperatur
- Gasdurchflußmenge
- Substratvorspannung
- Entladungsspannung
- relativer Abstand und Winkel von Target zum Substrat
- Restgasverunreinigungen und -druck
- Targetgeschichte und -temperatur

Der Druck in der Sputterkammer, die Targettemperatur und die Tiefe des Erosionsgrabens entscheiden über die Depositionsrates. Restgasverunreinigungen und der Gasfluß bestimmen den Grad der Verunreinigung der abgeschiedenen Schichten. Als Besonderheit kommt der gewollte oder ungewollte Einbau von Spezies aus dem Plasma in die wachsende Schicht hinzu^[105]. Letzterer kann durch die Substratvorspannung in gewissem Maße beeinflußt werden.

Da mit der Methode des Magnetronsputters die Schichtabscheidung durch eine Plasmaentladung hindurch erfolgt, die zwischen der Quelle der deponierten Atome, d.h. dem Target, und dem Substrat liegt, ist die Betrachtung des Einflusses des Plasmas auf die gesputterten Atome notwendig. Qualitativ bedeutet das Durchlaufen des Plasma für die gesputterten Atome eine Abbremsung durch Stöße mit anderen Spezies. Dieser Effekt wird Thermalisierung genannt, die gesputterten Targetatome werden durch das Sputtergas (und eventueller zusätzlicher reaktiver Gase) teilweise thermalisiert. Die Abhängigkeit der mittleren kinetischen Energie gesputterter Metallatome vom Arbeitsdruck in der Sputterkammer ist aus Abb. 3.2 zu erkennen. Mit steigendem Argondruck nimmt die Anzahl der Stöße zu und verringert die mittlere Energie der Atome, die auf das Substrat treffen. Der Einfluß des Sputterdruckes auf die mittlere Energie gesputterter Atome ist von der Masse der Atome abhängig. Für Elemente, die schwerer sind als das Sputtergas Argon ist er besonders groß, da ein großer Teil dieser Atome beim Durchlaufen des Hintergrundgases abgebremst, aber nicht wesentlich in ihrer Bewegungsrichtung beeinflußt werden. Von leichteren Atomen wie Kohlenstoff wird ein ungleich größerer Anteil durch die Streuung am Argon direkt reflektiert, weshalb der thermalisierte Anteil der zum Substrat gelangenden Atome kleiner ist als z.B. für Wolfram, und sich deshalb ihre mittlere kinetische Energie nahezu unbeeinflußt vom Sputterdruck verhält (vgl. Abb. 3.2 b). Untersuchungen der Energieverteilung von gesputterter Spezies während des reaktiven Magnetronsputters sind z.B. mit einem Fe-Target in unterschiedlichen Argon-H₂S-Mischungen durchgeführt worden^[106].

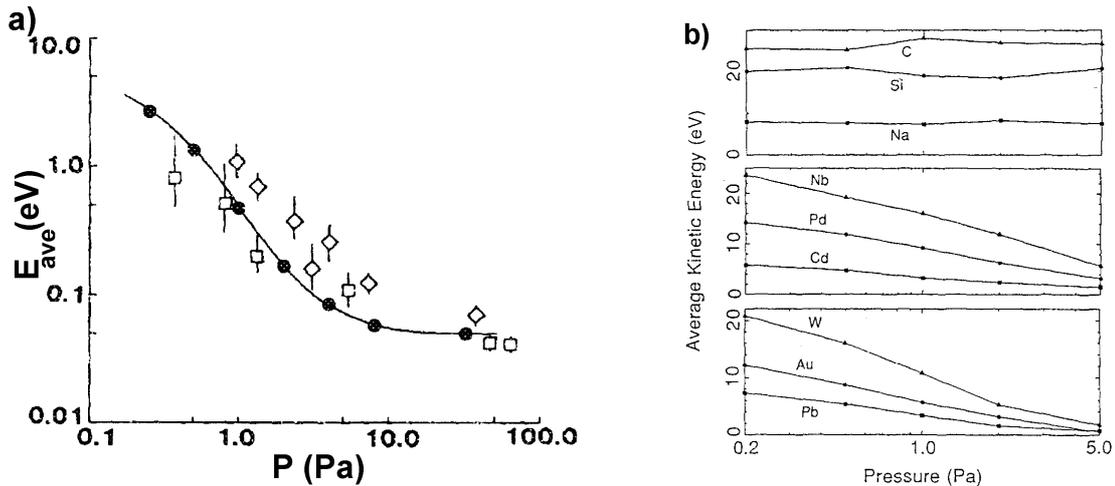


Abb. 3.2: Druckabhängigkeit der mittleren kinetischen Energie gesputterter Atome am Substrat für Kupfer (a; Monte-Carlo-Simulation \cdot und experimentelle Daten \square , $?$) und unterschiedliche andere Elemente als Targetmaterial (b) und jeweils mit Argon als Sputtergas. Während bei leichten Elementen die kinetische Energie nahezu druckunabhängig ist, kann z.B. für Wolfram ein starker Abfall der kinetischen Energie der gesputterten Atome im Druckbereich von 0,2 bis 5 Pa beobachtet werden (nach ^[107,108]).

Die Methode des Magnetronsputters ist für industrielle, d.h. großflächige Prozesse einfach skalierbar. Durch die Möglichkeit der Anordnung mehrerer Targets und entsprechender Magnete ist dabei auch gewährleistet, daß großflächige Substrate gleichmäßig beschichtet werden können^[109], was für Massenprodukte wie Solarzellen ein wichtiges Qualitätsmerkmal ist. In neuesten kommerziellen Anlagen können reaktiv gesputterte Schichten wie z.B. TiO_2 auf einer Breite von 3,8 m mit einer Abscheiderate von 22 nm·m/min hergestellt werden, die eine Abweichung der Schichtdickenverteilung von weniger als 2% aufweisen^[110].

3.3.1 REAKTIVES MAGNETRONSPUTTERN

Wird anstelle eines reinen Edelgases eine Mischung aus Edelgas und einem reaktivem Gas (z.B. O_2 , N_2 oder H_2S) verwendet, erweitert sich die Skala der möglichen Schichtzusammensetzungen durch die einfache Einstellung unterschiedlicher Gasmischungsverhältnisse. Auf diese Weise lassen sich je nach Wahl des Targets beliebige Oxide, Nitride oder Sulfide herstellen, wobei ein Teil des Reaktivgases in die wachsende Schicht eingebaut wird.

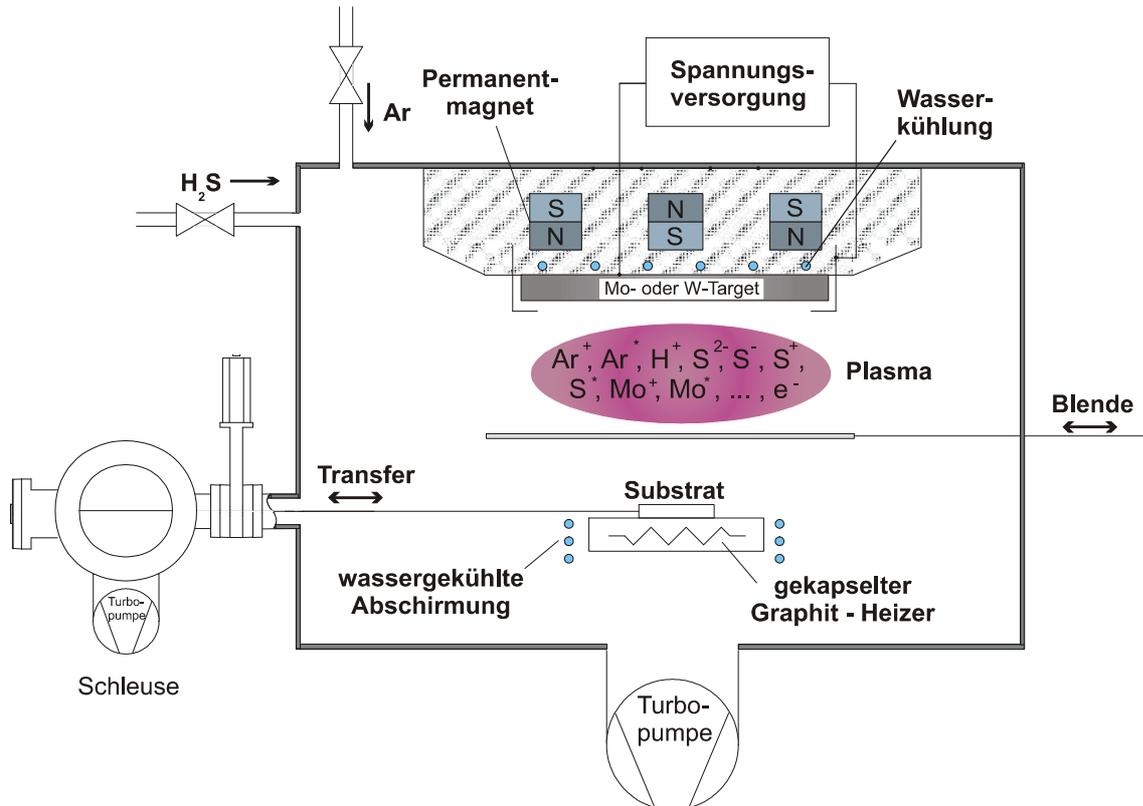


Abb. 3.3: Anordnung beim reaktiven Magnetronspütern mit H_2S . Die einfachsten im Plasma vorkommenden Spezies sind für den Fall angegeben, daß ein Molybdän-Target verwendet wird. Eine Blende ermöglicht das Vorsputtern zur Reinigung der Targetoberfläche von Adsorbaten, ohne das Substrat zu beschichten. Ar^* (S^* , Mo^*) bedeutet angeregtes Argon- (Schwefel-, Molybdän-) Atom.

Eine Untersuchung des reaktiven Plasmas einer H_2S -Ar-Mischung mit 80% H_2S -Anteil mit einem massenselektiven Plasmamonitor hat neben den zu erwartenden Ionenspezies Ar^+ und dem einfach positiv geladenen Metallion auch das Vorkommen sämtlicher Ionen der Reihe H_xS_y^+ mit $y = 1 \dots 11$ und $x = 0 \dots 5$ ergeben^[106]. Die gemessenen Häufigkeiten (Ionenstrom bei der entsprechenden Masse) fielen dabei von $y = 1$ bis 11 ab und wiesen für $y = 5$ und 8 lokale Maxima auf. Außerdem konnten dem Massenspektrum Molekülionen wie H_3SAr^+ , $\text{H}_3\text{S}_2\text{Ar}^+$ und Ar_2^+ zugeordnet werden. Wenigstens die Stabilität von H_xS_8^+ ist thermodynamisch durch die bei Normalbedingungen stabilste Schwefelmodifikation in Form von S_8 -Ringen plausibel. Das Auftreten von Ar enthaltenden Molekülionen läßt sich mit der extrem hohen Reaktivität von Ar^+ erklären, die der des isoelektronischen Chlorradikals entspricht. Die Absättigung der H_xS_y^+ -Ionen mit Protonen erfolgt dergestalt, daß für die Ionengruppen mit $y = 1$ bis 4 die H_3S_y^+ -Ionen und für $y = 5$ das S_5^+ -Ion als häufigste Spezies detektiert wurde.

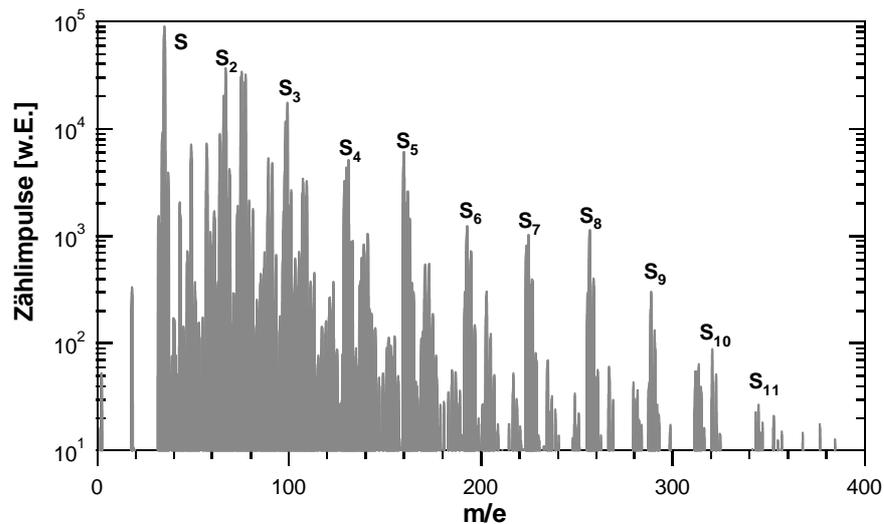


Abb. 3.4: Massenspektrum eines H_2S -Argon-Plasmas, das beim Magnetronputtern mit einem Fe-Target erzeugt wurde. Entladungsbedingungen: $P = 50 W_{DC}$; $p = 5 \cdot 10^{-2}$ mbar; $F_{H_2S} / (F_{H_2S} + F_{Ar}) = 0,8$. (nach ^[106])

Die Reaktionsmechanismen beim reaktiven Sputtern sind sehr kompliziert, weil im Plasma hohe Energien auftreten. Deshalb kann bzgl. der Stabilität der vorhandenen Reaktanden nicht mit der Thermodynamik und Kinetik von Festkörper-Gas-Reaktionen argumentiert werden. Prinzipiell gibt es drei verschiedene Orte, an denen die Reaktion von Metallatomen mit Schwefel stattfinden kann. Das ist erstens direkt am Target, zweitens im Plasma und drittens auf dem Substrat (vgl. Abb. 3.5). Nach Kenntnis des Autors gibt es bisher keine Untersuchung, welcher Reaktionsmechanismus im Falle des Reaktivsputterns von Sulfiden mit Wolfram- oder Molybdäntargets und H_2S tatsächlich auftritt. Reichelt und Mair^[62] betrachten für dieses Verfahren nur die dritte Möglichkeit und postulieren folgende Prozesse an der Schichtoberfläche:

- Einbau eines gesputterten Mo-Atoms an einen Mo-Gitterplatz von MoS_2
- Adsorption eines gesputterten S-Atoms
- Adsorption eines H_2S -Moleküls und Dissoziation
- Einbau eines adsorbierten S-Atoms an einen S-Gitterplatz von MoS_2
- Desorption eines adsorbierten S-Atoms ins Vakuum
- Reaktion von adsorbierten Mo- und S-Atomen zu MoS_2

Bisher wurden nur wenige Untersuchungen zum reaktiven Magnetronputtern von MoS_x von einem Molybdäntarget^[61,62,111] bzw. von WS_x von einem Wolframtarget^[52] durchgeführt. Die meisten Autoren benutzen Verbindungstargets (MoS_2 , WS_2) für die Schichtabscheidung. Desweiteren ist auch FeS_2 auf diese Weise abgeschieden worden^[112].

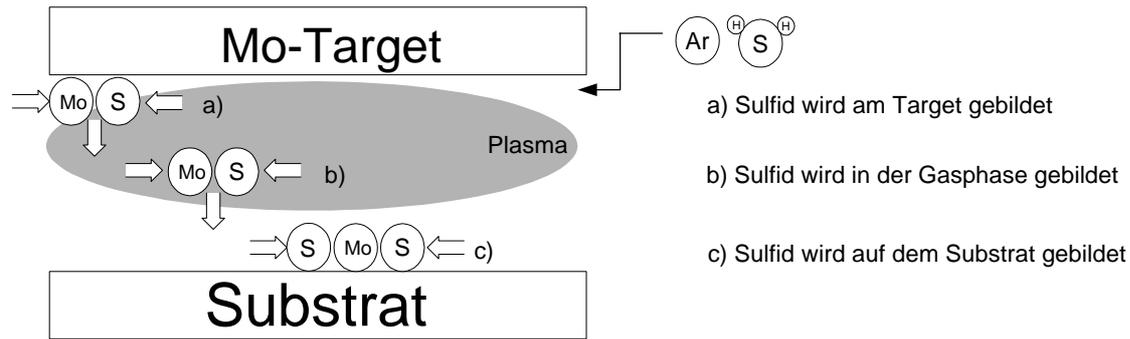


Abb. 3.5: Mögliche Orte der Bildung von Metallsulfiden beim Sputtern von einem metallischen Target und in einem H₂S-Ar-Gemisch am Beispiel von MoS₂. Die Wahrscheinlichkeit, daß sich MoS₂-Moleküle in der Gasphase bilden und dort stabil sind, ist kleiner als für die Bildung von MoS-Molekülen, so daß der Übersichtlichkeit halber nur letztere eingezeichnet sind (nach ^[113]).

3.3.2 MAGNETRONSPUTTERN VOM VERBINDUNGSTARGET

Die Abscheidung von MoS_x-Schichten durch Sputtern von einem Verbindungstarget ist eine verbreitete Methode und wurde sowohl im RF-^[51,78,79,84,114,115] als auch im DC-Entladungsmodus^[81] betrieben. Beim Sputtern von Verbindungstargets muß berücksichtigt werden, daß die unterschiedlichen Atome der Verbindung unterschiedlich leicht abgestäubt werden. Für MoS₂ z.B. ist durch die höhere Sputterrate von Schwefel die Targetoberfläche mit Mo angereichert^[104]. Deshalb kommt es zum ungleichmäßigen Abtrag von Atomen aus dem Target und es werden MoS_x-Schichten $x < 2$ erhalten. Eine Reihe von Experimenten zur Herstellung von WS_x-Schichten ist unter Verwendung eines WS₂-Verbindungstargets durchgeführt worden^[98]. Zur Erzielung stöchiometrischer WS₂-Schichten muß dem Ar-Sputtergas allerdings trotzdem noch H₂S zugegeben werden. Es wurden Schichten mit Stöchiometrien $0,3 \leq x \leq 3,5$ hergestellt, wobei nur die mit $0,7 \leq x \leq 1,95$ kristallin waren. Verbindungstargets haben allerdings den Nachteil einer schlechteren Verarbeitbarkeit gegenüber Metalltargets und sind außerdem deutlich teurer.

3.4 PLASMAPOTENTIAL UND PLASMAANREGUNG

3.4.1 POTENTIALVERLAUF BEIM SPUTTERN

Der Potentialverlauf für eine Magnetronentladung ist schematisch in Abb. 3.6 dargestellt. Während an der Kathode ein hohes negatives Potential auftritt (Kathodenfall), bildet sich an der Anode, auf der sich in der Regel das Substrat befindet,

nur ein niedriger Potentialabfall. Beide Elektrodenpotentiale ($U_{\text{Elektrode}}$) sind jedoch negativer als das Plasmapotential U_P , das sich nahezu auf Anodenpotential befindet. In den Raumladungszonen vor dem Target und der Anode werden geladene Teilchen (Ionen, Elektronen) beschleunigt. Die Energie E dieser Teilchen ergibt sich nach Gleichung (3.3), in der q die Ladung der entsprechenden Teilchen ist.

$$E = q(U_P - U_{\text{Elektrode}}) \quad (3.3)$$

Vom Target reflektierte oder aus der Kathode herausgeschlagene neutrale Atome (Ar, Mo) sowie positive Ionen wie Ar^+ , H^+ oder Mo^+ können ein auf schwebendem (floatendem) Potential befindliches Substrat treffen (U_{schw}). Elektronen und Anionen dagegen werden durch das in der Regel negative Floatingpotential vom Substrat ferngehalten, wenn deren Energie nicht die Potentialdifferenz $U_P - U_{\text{schw}}$ übersteigt. Die Stärke des Magnetfeldes (50 - 200 mT) wird außerdem so gewählt, daß die Elektronenbewegungen von ihm beeinflußt werden, die Ionen sich aber weitgehend unabhängig vom Magnetfeld bewegen können.

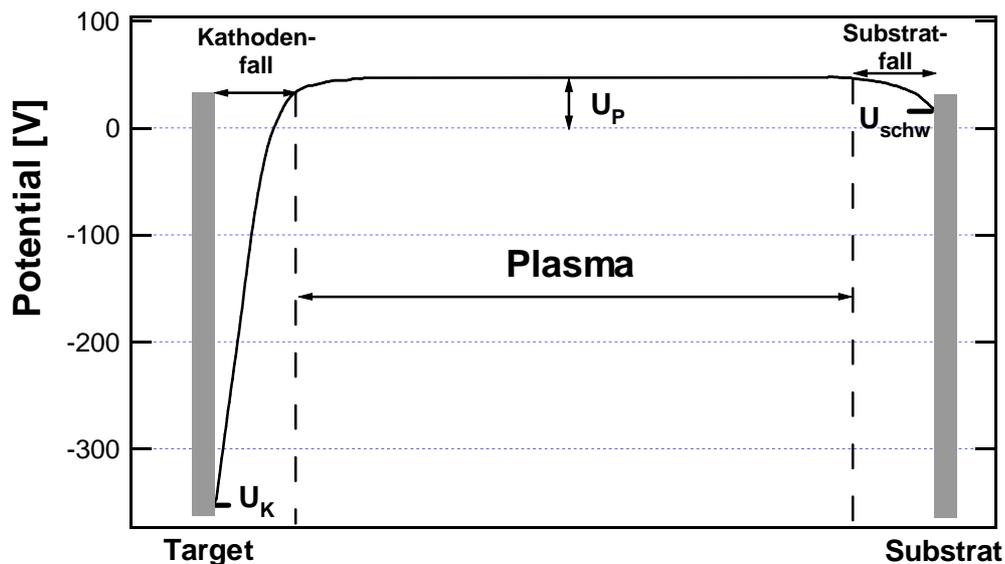


Abb. 3.6: Potentialverlauf zwischen Kathode (Target) und Substrat in einer Magnetronsputteranordnung.

3.4.2 DC-ENTLADUNG

Für das Sputterverfahren sind im wesentlichen zwei Modi der Plasmaentladung möglich. Beim DC-Sputtern stellt das Target die Kathode dar, während das Substrat meist als Anode fungiert, die auf Massepotential gelegt ist. Die Elektronen und

Edelgasionen des Plasma sorgen zwischen den Elektroden für den Ladungstransport. Deshalb ist das Sputtern von Targets, die aus isolierenden Materialien bestehen, nicht möglich. Die Argonionen können an der Kathode nicht entladen werden, so daß die Entladung verlöscht. Die Entladespannung einer Gleichspannungsentladung wird im wesentlichen durch die Sekundärelektronenemission des Targets bestimmt.

3.4.3 HF-ENTLADUNG

Wird dagegen die Sputterquelle mit einer hochfrequenten Wechselspannung (üblicherweise 13,56 MHz) betrieben, so erhöht sich in erster Linie die Plasmadichte vor dem Substrat, weil die Einschnürung des Plasmas in der positiven Halbwelle der Wechselspannung nicht mehr nicht so effektiv ist, wie in einer DC-Entladung^[35]. Die Elektronen im Plasma selbst, nicht mehr die Sekundärelektronen des Targets, dominieren die Ionisation des Sputtergases, weil sie leichter sind und dem oszillierenden elektrischen Feld besser folgen können. Dieser Unterschied zur Gleichspannungsentladung bewirkt, daß der HF-Betrieb den effektiveren Sputtermodus darstellt. Die Entladespannung ist vom Betrag geringer, so daß nur Sputterraten erzielt werden können, die bei kleiner Sputterleistung bis zum Faktor 7 kleiner sein können^[35], als bei entsprechenden DC-Bedingungen. Der wesentliche Vorteil der HF-Entladung besteht in der Möglichkeit, auch isolierende Targetmaterialien wie Oxide oder sogar Polymere verwenden zu können. Damit erweitert sich der Einsatzbereich des Sputterns als Beschichtungstechnik auf die unterschiedlichsten Verbindungen, die in der industriellen Massenfertigung interessant sind. Der Einsatz erstreckt sich von der Aluminiumbeschichtung auf digitalen Speichermedien ("Silberlinge") bis auf transparente und leitfähige Fensterschichten für LCD-Bildschirme. Die Mehrheit der Arbeiten über gesputtertes MoS_x bzw. WS_x wurden mit einem Verbindungstarget MS_2 und deshalb im HF-Entladungsmodus durchgeführt.

Neue Untersuchungen zeigen, daß auch das Pulsen (50 - 250 kHz) der Anregungsspannung Auswirkungen auf die Textur dünner Silizium-Schichten haben kann^[116].

3.5 WIRKUNG VON PLASMAPROZESSEN AUF FESTKÖRPEROBERFLÄCHEN

Plasmaabscheidungen gehen immer mit einem zusätzlichen Ionenbeschuß der entstehenden Schicht einher. Dieser kann einerseits erwünscht sein, wenn durch den Energieeintrag eine erhöhte Oberflächenbeweglichkeit der Adsorbate zu kompakteren Schichten und damit besseren Schichteigenschaften führt. Defekte in der Kristallstruktur, die beim Aufbau jeder Atomlage entstehen, können so gleich oder durch Diffusion in das Schichtinnere verringert werden. Andererseits ist auch ein

Wiederabtragen der Schicht, also eine Verringerung der Abscheiderate durch Rücksputtern oder die Bildung von kristallographischen Defekten bei höheren Teilchenenergien (≥ 50 eV) möglich. Außerdem können zusätzliche inerte Spezies adsorbiert oder eingebaut (Implantation) werden^[117]. Abb. 3.7 stellt die beim Sputtern hauptsächlich vorkommenden Einflüsse schematisch dar. Die Bildung von Defekten führt zum Auftreten von mikroskopischen und submikroskopischen Spannungen im Bereich von Kristalliten (Körnern) oder einzelnen Bindungen.

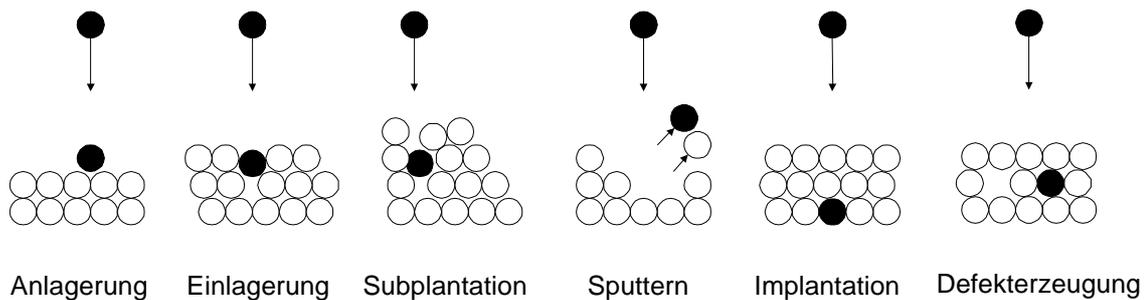


Abb. 3.7: Schematische Darstellung der Prozesse, die bei plasmagestützten Abscheidungen am Substrat ablaufen, und die Schichteigenschaften beeinflussen können^[103].

Der Ionenbeschuß kann dazu führen, daß in einer dünnen Schicht zum Teil erhebliche^[116] mechanische Schichtspannungen auftreten. In Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen können das Druck- oder Zugspannungen sein. Für empfindliche Schichten, wie es z.B. Halbleiterschichten darstellen, können durch die hohen Ionenenergien beim Sputtern z.T. hohe Defektdichten in den Schichten entstehen^[98].

3.6 VOR- UND NACHTEILE DES MAGNETRONSPUTTERNS

Das Abscheideverfahren des Magnetronsputtern hat einige wichtige Vorteile, die hier kurz erläutert werden. Es ist vor allem eine relativ preisgünstige Methode und für sehr viele Materialien einsetzbar, die als funktionelle dünne Schichten abgeschieden werden sollen. Sputteranlagen können in großen Dimensionen gebaut werden, eine industrielle Beschichtung von Massenwaren ist ein etabliertes Verfahren. Die Methode ist daher einfach auf große Flächen skalierbar. Prinzipiell reduziert das Sputtern die notwendigen Prozeßtemperaturen, so daß preiswerte Substrate, wie Glas oder Polymerwerkstoffe einsetzbar sind. Ein möglicher Nachteil des Sputterns ist das Auftreten hochenergetischer Teilchen in der Entladung. Diese können beim Auftreffen Defekte im Kristallgitter erzeugen, so daß gesputterte Schichten häufig hohe Defektdichten aufweisen^[98]. Außerdem müssen die zu sputternden Materialien in die Form des Targets gebracht werden. Isolierende Verbindungen können nur durch HF-Anregung gesputtert

werden, was höhere Anschaffungskosten für die HF-Netzteile verursacht als für Gleichspannungsnetzteile.