

B EXPERIMENTELLES

6 SCHICHTPRÄPARATION VON MoS_x UND WS_x DURCH REAKTIVES MAGNETRONSPUTTERN

6.1 SPUTTERANLAGEN

MoS_x - und WS_x -Schichten wurden in zwei verschiedenen Beschichtungskammern durch reaktives Magnetronsputtern hergestellt. Eine stationäre Anlage (UHV-Anlage) wurde für Vorversuche verwendet, eine zweite, etwas kleinere, ist so konstruiert, daß sie zu den in situ-Experimenten zum HASYLAB nach Hamburg transportiert werden kann. Die HASYLAB-Anlage ist in Abb. 6.1 dargestellt. Zur Gewährleistung konstanter Bedingungen von einer Abscheidung zur nächsten wurden beide Sputterkammern mit einer Schleuse betrieben, die mit Stickstoff belüftet wurde. Ein Graphitheizer, mittels Bornidrid gekapselt, ermöglichte das Aufheizen des Substrates auf Temperaturen bis zu 800°C . Das Substrat ist in der HASYLAB-Anlage vertikal montiert, da die Beugungsebene am HASYLAB-Meßplatz F3 horizontal liegt. Der Weißlicht-Röntgenstrahl trifft nach Durchtritt durch ein $70\ \mu\text{m}$ dickes Kaptonfenster das Substrat; die gebeugte Röntgenstrahlung wird durch ein weiteres Kaptonfenster beobachtet. Das Folienmaterial Kapton, ein Polyimid, wurde als Fenster benutzt, da es sich durch eine geringe Absorption des Röntgenstrahls und eine ausreichende Vakuumdichtheit auszeichnet, sowie nach Beschichtung durch den Sputterprozeß einfach ausgetauscht werden kann. Die Sputterblende ist so angebracht, daß ein Beugungsspektrum des Substrates auch bei geschlossener Blende aufgenommen werden kann. Eine in situ-Messung wird durch das Öffnen der Blende vor der Sputterquelle gestartet.

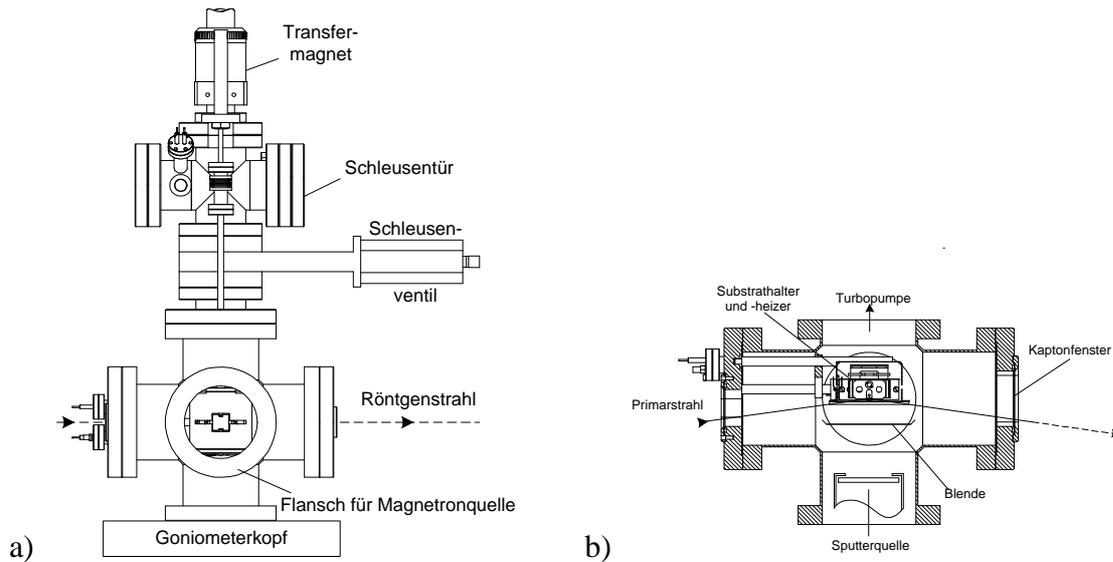


Abb. 6.1: *Transportable Magnetronspalteranlage für in situ EDXRD-Experimente mit Synchrotronstrahlung am HASYLAB. Frontalansicht (a) der mit Schleuse. Die Transferstange ist gekürzt dargestellt, die Magnetronquelle aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen worden; dies ermöglicht die Sicht auf den Probenhalter. Der horizontale Querschnitt durch die Kammer in der Ebene des Synchrotronstrahls (b) verdeutlicht die Anordnung von Probenhalter und -heizer sowie der Blende und der Sputterquelle^[34].*

6.2 STANDARDABSCHIEDEBEDINGUNGEN

Eine Abscheidung wurde nach den folgenden Schritten durchgeführt. Das verwendete Substrat wird in Ethanol gereinigt, auf dem Substrathalter fixiert und anschließend in die Sputterkammer eingeschleust. Um eine thermische Expansion des Substrathalters zu verhindern, wurde dieser aus Invar (FeNi-Legierung) konstruiert und eine Vorheizphase von mindestens 15 min eingehalten. Während dieser Vorheizphase wurde die gewählte Substrattemperatur erreicht und dann über eine Regelung konstant gehalten. Gleichzeitig kann der gewünschte Sputterdruck und das Gasflußverhältnis zwischen Argon und H_2S eingestellt werden. Waren alle Parameter stabil und die Sputterleistung vorgegeben, konnte mit dem Vorsputtern bei geschlossener Blende gestartet, d.h. das Plasma gezündet werden. Der Vorsputterprozeß von einige Minuten gewährleistet, daß das Target eine gleichmäßige und reproduzierbare Oberflächenzusammensetzung aufweist und etwaige Oxide von ihm abgesputtert werden. Mit Öffnen der Blende beginnt die Beschichtung des Substrats. In der Regel dauerte sie etwa 20 min, so daß die Schichtdicken zwischen 30 und 3000 nm betragen. Die Beschichtung wurde beendet, indem die Spannungsversorgung der Sputterquelle ausgeschaltet wurde und das Plasma erlischt. Nachdem das Substrat abgekühlt war, wurde es ausgeschleust und bis zu weiteren Untersuchungen an Laborluft gelagert.

Die Messung der Substrattemperatur wurde kalibriert, indem für beide Anlagen eine Kalibriergerade ermittelt wurde, mit der die Heizertemperatur in eine Substrattemperatur umgerechnet werden konnte. Die Kalibriergerade wurde durch Messen der Substrattemperatur mit Ni-NiCr-Thermoelementdrähten unter Vakuumbedingungen bestimmt. Dazu wurden die Drähte auf einem unbeschichteten Quarzglassubstrat mit einem Keramikkleber befestigt und aus der Vakuumkammer geführt. Die Heizertemperatur wird in der UHV-Anlage durch ein Thermoelement gemessen, das an die Unterseite des Heizers, d.h. auf der der Sputterquelle abgewandten Seite, angedrückt wird. In der HASYLAB-Anlage befindet sich dieses Thermoelement in einer Keramikhülse zwischen Heizer und Substrat. Die Kalibriergeraden für beide Anlagen gelten nur für Substrattemperaturen $> 75^{\circ}\text{C}$.

Die Standardabschiedebedingungen für die MoS_x - und WS_x -Beschichtungen sind in Tabelle 6.1 angegeben.

Tabelle 6.1: Standardabschiedebedingungen für Reaktives Magnetronspütern von MoS_x und WS_x

	ex situ UHV-Kammer	in situ HASYLAB- Anlage	Variationsbereich	
			min. Wert	max. Wert
Targetdurchmesser	101,6 mm	50,8 mm	-	-
Sputterdruck	0,04 mbar	0,04 mbar	0,005 mbar	0,09 mbar
Substrattemperatur	447 °C	447 °C	200°C	700°C
Sputterleistung	50 W _{DC}	50 W _{DC}	12W	200W
Gasflußverhältnis $F_{\text{H}_2\text{S}} / (F_{\text{H}_2\text{S}} + F_{\text{Ar}})$	75 %	75 %	9 %	83 %
Substratvor- spannung	schwebend (floating)	schwebend (floating)	0 V (auf Masse)	-300 V
Abstand Target-Substrat	50 mm	60 mm	-	-
Substrate	Floatglas / Quarzglas	oxidiertes einkristallines Si (100)	Si(100); Si(111); Si/SiO ₂ /Surfactants [Ni, Co]; Sigradur	

6.3 SPUTTERQUELLE

Für das reaktive Magnetronspütern wurde in der stationären Anlage eine leicht unbalancierte 4-Zoll-Magnetronspüternquelle IX4U_9B06 der Firma Thin Film Consulting (Grafenberg) mit $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Magneten benutzt. Im balancierten Zustand (durch Zuschalten von Elektromagnetspulen erreichbar) erzeugen die Magneten dieser Quelle im Abstand von 5 mm vom Target (5,5 mm dick) ein Magnetfeld, dessen vertikale Komponente B_z im Mittelpunkt eine Stärke von etwa 70 mT aufweist.

Abb. 6.2 und Abb. 6.3 zeigen die Spüternquellenanordnung und die Ausdehnung des Plasmas in Abhängigkeit vom eingestellten Spüterndruck. Alle vier Bilder geben den gleichen Bildausschnitt wieder, so daß die Lage der Substratebene verglichen werden kann. Es ist erkennbar, wie sich bei Erhöhung des Spüterndruckes der sichtbare Teil des Plasmas in Richtung des Substrats ausdehnt.

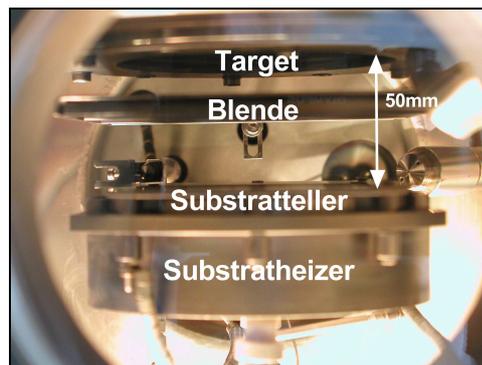


Abb. 6.2: 4-Zoll-Magnetronspüternquelle der UHV-Anlage. Zu erkennen sind Substratteller, Substratheizer und die Blende, die pneumatisch nach hinten weggezogen werden kann. Der Abstand zwischen Target und Substrat beträgt 50 mm, der Targetdurchmesser 101,6 mm.

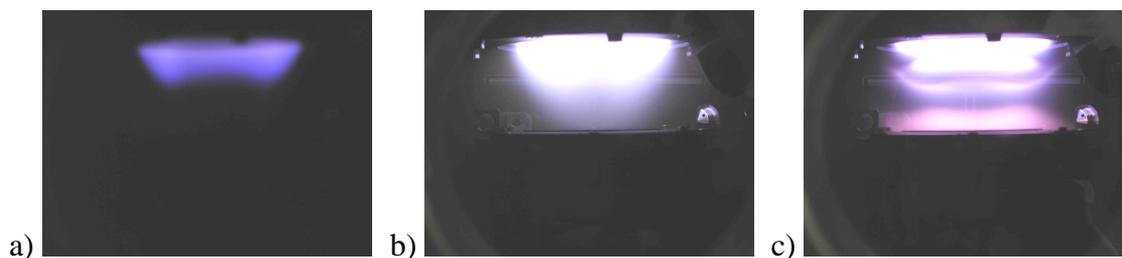


Abb. 6.3: Ausdehnung des Plasmas bei (a) $p = 5 \cdot 10^{-4}$ mbar und $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}} + F_{\text{Ar}}) = 0$; (b) $p = 2,2 \cdot 10^{-3}$ mbar und $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}} + F_{\text{Ar}}) = 0,5$; (c) $p = 9 \cdot 10^{-2}$ mbar und $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}} + F_{\text{Ar}}) = 0,5$. Sonstige Entladungsbedingungen: $50W_{\text{DC}}$; Substrat auf Massepotential (0V); UHV-Anlage. Die Aufnahmen zeigen den gleichen Bildausschnitt wie Abb. 6.2.

In der HASYLAB-Spüternkammer wurde eine 2-Zoll-Magnetronquelle Torus 2C der Firma K. J. Lesker Co. (Clairtron, PA) verwendet. Der Betrieb im HF-Entladungsmodus bei 13,56 MHz wurde über ein Anpaßnetzwerk gewährleistet.

Eine wichtige Kenngröße beim Magnetronspütern ist der Ionenstrom auf eine wachsende Schicht. Zur Bestimmung des Ionenstroms wurden Messungen von Strom-Spannungs-Kennlinien an planaren Langmuirsonden durchgeführt.

Aus den Strom-Spannungs-Kennlinien in einem reinen Argonplasma konnten in der UHV-Anlage durch vier Langmuirsonden die Ionensättigungsströme an vier Orten auf der Substratoberfläche bestimmt werden. Beim Sputtern vom Molybdäntarget bei einem Argondruck von $9 \cdot 10^{-3}$ mbar und einer Leistung $100 \text{ W}_{\text{DC}}$ ergaben sich unterschiedliche Ionensättigungsströme für die vier Sondenpositionen. Aus Abb. 6.4 sind diese in Abhängigkeit vom Abstand der Sonden vom Substrat- bzw. Targetmittelpunkt erkenntlich. Direkt unter dem Targetmittelpunkt wurde ein Argonionensättigungsstrom von etwa 1 mA/cm^2 gemessen, er fällt bei einem Abstand von 15 mm vom Mittelpunkt ab, um direkt unter dem Erosionsgraben sein absolutes Maximum zu erreichen. Zum Rand des Substrats fällt der Ionenstrom wieder stark ab. Da die Messung in reinem Argon durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß der Ionensättigungsstrom, der nur Kationen erfaßt, zum überwiegenden Teil aus Argonionen besteht.

Das Plasmapotentials wurde bei diesen Messungen zu $-10,3 \text{ V}$ bestimmt, das Floating-potentials betrug $-25,8 \text{ V}$. Daraus ergibt sich eine kinetische Energie der auf das Substrat treffenden einfach geladenen Ionen von $15,5 \text{ eV}$.

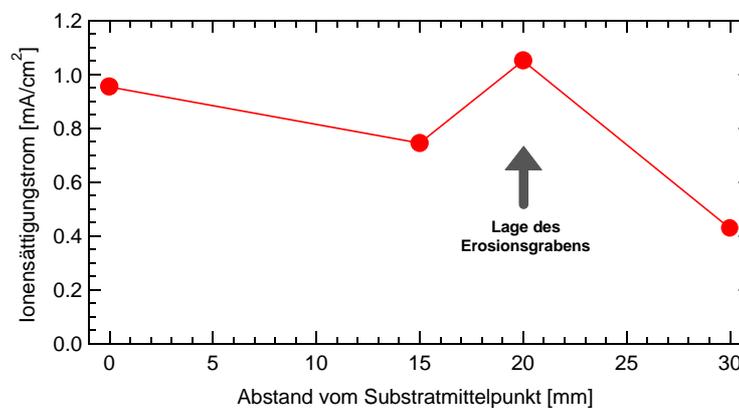


Abb. 6.4: Ionensättigungsstrom beim Sputtern vom Molybdän-Target in reinem Argon in Abhängigkeit vom Abstand der Langmuirsonde vom Mittelpunkt des Substrats (Abstand Target-Sonde 50 mm). Entladebedingungen: $P = 100 \text{ W}_{\text{DC}}$; $p = 9 \cdot 10^{-3}$ mbar.

Bei den verwendeten Targetdurchmessern von zwei und vier Zoll treten beim Magnetronspütern deutliche Schichtdickeninhomogenitäten auf (vgl. Abb. 6.5), die wie die Ionenstrommessungen die ringförmige Konzentration der Entladung und die entsprechende Zerstäubung des Targets widerspiegeln. Die Messung in der stationären

Anlage zeigt, daß über einen Durchmesser von mindestens 50 mm die Homogenität der Schichtdicke $\pm 5\%$ beträgt.

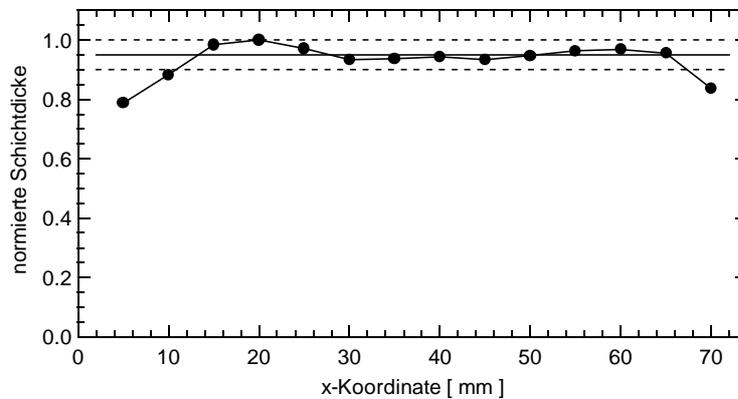


Abb. 6.5: Normierte Schichtdickenverteilung beim Sputtern von Molybdän in reinem Ar auf ein Glassubstrat bei einem Abstand Target-Substrat von 50 mm in der UHV-Anlage. Abscheidebedingungen: $200 W_{DC}$; $p = 4,4 \cdot 10^{-2}$ mbar, $T_{sub} = 55^\circ C$; 6 min; maximale Schichtdicke = 630 nm.

6.4 SUBSTRATE, GASE UND TARGETS

Die nominellen Reinheiten und vom Hersteller angegebenen Verunreinigungen der verwendeten Substrate, Gase und Targets können Tabelle 6.2 entnommen werden.

Die Reinheit des benutzten H_2S hat direkten Einfluß auf die Verunreinigungen der Schicht und damit auch auf die elektronischen Schichteigenschaften. H_2S ist nicht in hoher Reinheit erhältlich, da es nicht in technischen Prozessen, die hohe Reinheiten erfordern (Mikroelektronik), eingesetzt wird. Deshalb wurde die Reinheit des uns zur Verfügung stehenden H_2S massenspektrometrisch überprüft. Dazu wurde ein Massenspektrometer AccuQuad der Firma K. J. Lesker Co. (Clairtron, PA) verwendet. In Abb. 6.6 ist ein Massenspektrum des H_2S -Gases (99,99%) dargestellt, das in der UHV-Anlage benutzt wurde. Neben den Hauptsignalen bei $m/e = 34$, 33 und 32 für H_2S , HS und S mit dem häufigsten Schwefelisotop ^{32}S (natürliches Vorkommen 95,0%) ist die H_2S -Gruppe für das Isotop ^{34}S (Häufigkeit 4,2%) zu erkennen.

Tabelle 6.2: Reinheit bzw. Qualität der verwendeten Substrate, Gase und Sputtertargets (Die Bezeichnungen HASYLAB und UHV dienen zur Unterscheidung der beiden verwendeten Abscheidkammern: transportable HASYLAB-Kammer für in situ-Messungen und UHV für die stationäre Kammer).

	Lieferant	Reinheit / Qualität (nominell)	Verunreinigungen (nominell)
Kalk-Natron-Glas (Floatglas)	Schröder Spezialglas	72,8% SiO ₂ , 13,8% Na ₂ O, 8,6% CaO, 3,6% MgO, 0,7% Al ₂ O ₃	
Quarzglas	Schröder Spezialglas	Corning Code 7940 99,9% SiO ₂	0,08 - 0,1% OH; andere < 1 ppm
Glas-kohlenstoff	HTW (Thierhaupten)	Sigradur G > 99,9% C	10-20 ppm Si, 10-20 ppm Ca, ≤10 ppm Al, andere ≤ 1 ppm
Silizium 375 μm Dicke	Silicon Sensor	p-Si (100): thermisch oxidiert (100 nm amorphes SiO ₂) / 3-12 Ωcm; 3° fehlorientiert	
		n-Si (100), 3,5 Ωcm, 0° fehlorientiert	
		n-Si (111), 10 Ωcm, 3° fehlorientiert	
		n-Si (111), 6 Ωcm, 0° fehlorientiert	
Ar	Messer-Griesheim (HASYLAB)	99,99%	≤10 ppm H ₂ O, ≤5 ppm O ₂ , ≤0,2 ppm CO ₂ , ≤0,2 ppm KW
	Linde (UHV)	99,998%	≤10 ppm N ₂ , ≤5 ppm H ₂ O, ≤3 ppm O ₂ , ≤0,5 ppm KW
H ₂ S	Scottgas, NL (HASYLAB)	99,5%	<3500 ppm COS, <300 ppm THC [Tetrahydrocannabinole] <500 ppm CO ₂ , <500 ppm N ₂ , <100 ppm O ₂ , <100 ppm CS ₂
	Messer-Griesheim (UHV)	> 99,99% ("electronic grade")	<20 ppm CO ₂ , <20 ppm H ₂ , <20 ppm N ₂ , <50 ppm Ar+O ₂ , <1 ppm KW [C1-C4]
Mo Ø 2 Zoll x 5 mm; Ø 4 Zoll x 5,5 mm	Freiberger NichtEisenmetalle (FNE)	99,95%	
W Ø 2 Zoll x 5 mm	Freiberger NichtEisenmetalle	99,96%	

Die Signalgruppe $m/e = 18, 17$ und 16 ist typisch für das Auftreten von Wasser als Verunreinigung. Im vorliegenden Fall muß allerdings beachtet werden, daß auch die zweifach geladenen Ionen der H_2S -Gruppe, bei diesem Masse-zu-Ladungsverhältnis auftreten. Die integrale Intensität des Wassersignals bei $m/e = 18$, die 6% der des H_2S -Signals bei $m/e = 34$ entspricht, wird demnach nicht allein durch Verunreinigung an Wasser sondern gleichzeitig durch doppel ionisiertes H_2S verursacht. Da die Wahrscheinlichkeit der Ionisation zum H_2S^{2+} -Ion jedoch kleiner ist als für H_2S^+ können die 4,2% natürliche Häufigkeit des Isotops ^{34}S nicht vollständig von der Signalfläche bei $m/e = 18$ subtrahiert werden, d.h. es ist mit dieser einfachen massenspektrometrischen Analyse nicht feststellbar, wie hoch die tatsächliche Wasser-Verunreinigung des Reaktivgases H_2S ist. Als weitere Verunreinigungen liegen mit HCN , CO_2 und COS ($m/e = 27, 44$ und 60) kohlenstoffhaltige Verbindungen vor, die aus der petrochemischen Herkunft des H_2S herrühren.

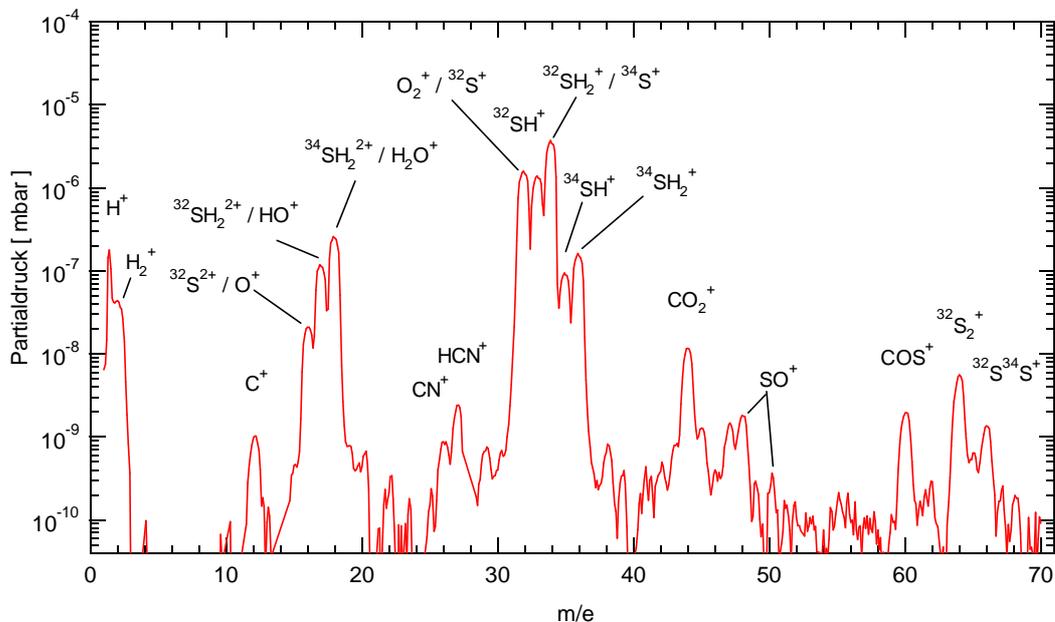


Abb. 6.6: Massenspektrum des in der UHV-Anlage verwendeten H_2S (Reinheit nominell: 99,99%) abzüglich des Restgasspektrums. Verunreinigungen sind insbesondere HCN , CO_2 und COS ($m/e = 27, 44$ und 60). Das Massenspektrometer wurde über eine Druckstufe (Lochblenden-durchmesser 1 mm) mit der Sputterkammer verbunden (Kammerdruck $2,7 \cdot 10^{-3}$ mbar; Druck am Spektrometer $9,6 \cdot 10^{-7}$ mbar).

6.5 PLASMAENTLADUNGSBEDINGUNGEN

Die wesentlichen Abscheidebedingungen für plasmaunterstützte Dünnschichtabscheidungen werden durch die physikalischen Parameter Sputterleistung, Sputterdruck, Sputtergaszusammensetzung, Entladungsart, Substrattemperatur und Substratpotential vorgegeben. In diesem Abschnitt sollen für typische Variationsbereiche dieser Parameter die daraus resultierenden Entladungsspannungen (Abb. 6.7) und Abscheideraten (Abb. 6.8, Abb. 6.9) dargestellt werden.

Die Entladungsspannung hängt im wesentlichen von den Eigenschaften des Plasmas, der Sputterquelle und des Targets ab. Mit zunehmender Sputterleistung steigt auch die Entladungsspannung. Die Entladungsspannung bestimmt nach Gleichung (3.3) die maximale Energie der Argonionen am Target und damit auch von Argonspezies, die vom Target reflektiert werden. Das bedeutet, daß sie Auskunft über den Energieeintrag in die wachsende Schicht liefert. Wird beim Sputtern von ein und demselben Target die Anregungsart von einer Gleichspannung zu einer hochfrequenten Wechselspannung verändert, fällt dabei die Entladungsspannung um etwa die Hälfte bis zu fast 75%. Der Vergleich zwischen einer DC-Entladung bei einem Molybdän- und einem Wolframtarget zeigt ähnliche Entladungsspannungen. Bei der Variation der Sputterleistung ist die Entladespannung beim Sputtern vom Wolframtarget etwas höher als beim Molybdäntarget, während die Variation des Gasflußverhältnisses eine leicht erhöhte Entladungsspannung am Molybdäntarget aufweist. Eine Veränderung der Zusammensetzung des Sputtergases bewirkt die Wechselwirkung anderer Konzentrationen der vorhandenen Ionenspezies an der Targetoberfläche und deshalb ebenfalls eine Änderung der Entladungsspannung. Mit zunehmendem H₂S-Anteil am Gasflußverhältnis $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}}+F_{\text{Ar}})$ steigt in einem Argon-H₂S-Plasma die Entladungsspannung. Entsprechend der Abhängigkeit von der Sputterleistung ist die Entladungsspannung auch bei der Variation der Plasmazusammensetzung unter HF-Entladung um mehr als den Faktor zwei kleiner als bei einer DC-Entladung. Der Anstieg bei Zunahme des H₂S-Anteils im Plasma ist allerdings geringer als bei einer DC-Entladung.

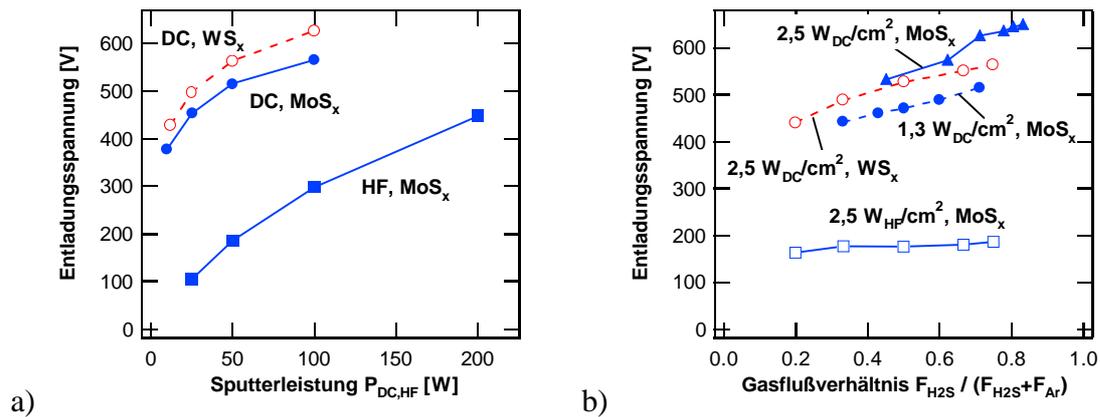


Abb. 6.7: Entladungsspannung in Abhängigkeit von der Sputterleistung bei einem Gasflußverhältnis $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}}+F_{\text{Ar}}) = 0,75$ (a) und in Abhängigkeit vom Gasflußverhältnis $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}}+F_{\text{Ar}})$ bei $P = 50 \text{ W}_{\text{HF, DC}}$ (b). Abscheidebedingungen: $p = 0,04 \text{ mbar}$.

Die Abscheiderate ist ein wichtiger Prozeßparameter, da in der industriellen Massenbeschichtung die Verweildauer der Substrate in der Abscheidekammer ein bedeutender Kostenfaktor ist. In Abb. 6.8 ist die Abscheiderate in Abhängigkeit von der Sputterleistungsdichte der Sputterquelle sowie vom Gasflußverhältnis $F_{\text{H}_2\text{S}}/(F_{\text{H}_2\text{S}}+F_{\text{Ar}})$ dargestellt. Die Abscheiderate wurde durch Division der Schichtdicke, die mit dem Profilometer bestimmt wurde, durch die Gesamtabscheidezeit ermittelt. Die Sputterleistungsdichte wurde als Abszisse gewählt, damit Sputterquellen mit unterschiedlichen Abmessungen (hier: 2 und 4 Zoll Durchmesser) verglichen werden können. Erwartet wird ein linearer Anstieg der Abscheiderate mit zunehmender Sputterleistung^[35,186]. Diese Abhängigkeit wird für große Leistungen in allen dargestellten Fällen auch beobachtet. Nur für kleine Leistungen trifft sie nicht exakt zu, da die Schichtdickenbestimmung bei kleinen Schichtdicken mit einem großen Fehler versehen ist. Es ist erkennbar, daß die Abscheiderate mit zunehmendem Druck, mit dem Wechsel von DC- zu HF-Entladebedingungen sowie beim Übergang vom Mo- zum W-Target geringer wird. Der Unterschied zwischen den Abscheideraten beim Sputtern vom Mo- bzw. vom W-Target ist allerdings nicht durch die Sputterraten erklärbar. Sie unterscheiden sich nur unwesentlich und liegen für beide Metalltargets zwischen 0,5 und 0,6 (vgl. Abschnitt 3.3). Höhere Drücke in der Sputterkammer bewirken eine erhöhte Streuung der vom Target abgesputterten Atome beim Durchgang durch das Sputtergas auf dem Weg zum Substrat, so daß pro Zeiteinheit weniger Material auf dem Substrat abgeschieden wird. Dieses Verhalten wird durch die Darstellung der Abscheiderate in Abhängigkeit vom Gesamtdruck in der Sputterkammer in Abb. 6.9 bestätigt. In diesem Diagramm können allerdings die normierten Abscheideraten von MoS_x - und WS_x -Abscheidungen nicht direkt verglichen werden, weil die Normierung aufgrund der Fläche unter den Fluoreszenzlinien MoK_α und WL_α durchgeführt wurde. Die natürliche Anregungswahrscheinlichkeit für diese beiden Fluoreszenzlinien ist unterschiedlich groß und wurde bei der Normierung nicht berücksichtigt.

Die niedrigere Entladespannung bei gleicher Nennleistung unter HF-Entladebedingungen geht ebenfalls mit einer Erniedrigung der Abscheiderate einher.

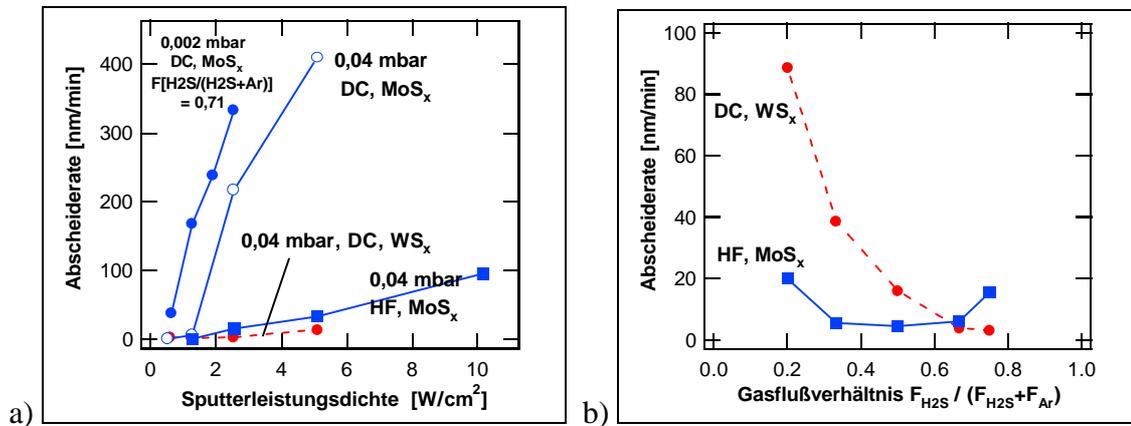


Abb. 6.8: Abscheiderate in Abhängigkeit von der Sputterleistungsdichte (a), bei einem Gasflußverhältnis $F_{H_2S}/(F_{H_2S}+F_{Ar}) = 0,75$ sowie in Abhängigkeit vom Gasflußverhältnis $F_{H_2S}/(F_{H_2S}+F_{Ar})$ bei einer Sputterleistung von 50 W (b).

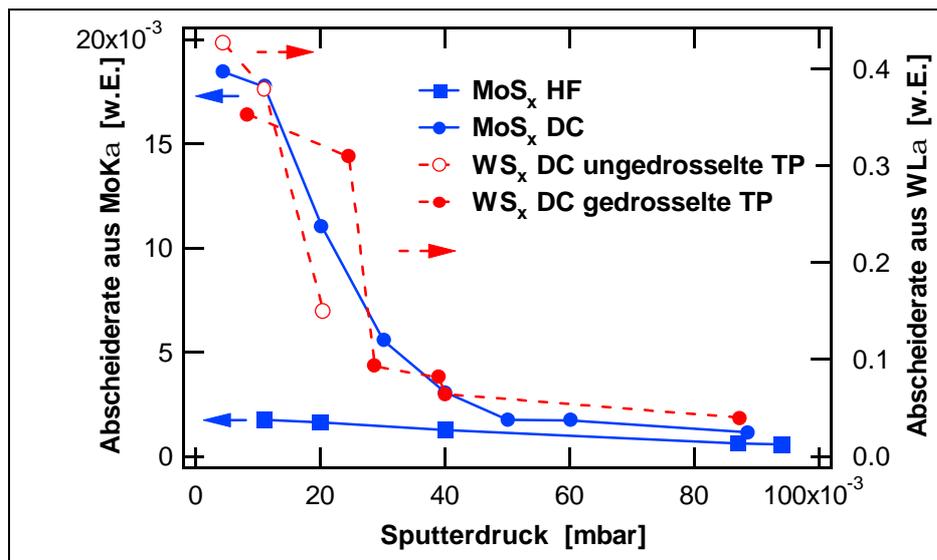


Abb. 6.9: Normierte Abscheiderate berechnet aus der integralen Signalintensität der Fluoreszenzlinien MoK_a oder WL_a in Abhängigkeit vom Sputterdruck. Zu beachten ist die beobachtete Abhängigkeit der Abscheiderate von der Stellung des Drosselventils zwischen Sputterkammer und Turbopumpe (TP) bei den WS_x-Abscheidungen.

Die Abhängigkeit der Abscheiderate von der Saugleistung der Turbopumpe (gedrosselt, ungedrosselt) weist auf den Einfluß der Gasströmung auf den Materialtransport vom Target zum Substrat hin. Die Gasströmung ist in der transportablen HASYLAB-Sputterkammer bedingt durch die Anordnung Gaseinlaß/Quelle/Substrat/Pumpstutzen direkt von der Quelle zum Substrat gerichtet. Beim sogenannten Gasflußsputtern mit Hohlkathodenquellen^[187] wird dieser strömungsunterstützte Materialtransport gezielt ausgenutzt.

