



PROTOKOLL

Dünnschichttechnologie und Gasphasenabscheidung

Armin Penz, Jakob Riccabona, Rebecca Anna-Maria Hofer und Liane Perktold

Betreuer: Christoph Grießer, MSc und Daniel Winkler, MSc

Versuchsdatum: 16.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	Theoretische Durchführung	2
2.1	Vorbereitung	2
2.2	Herstellung der Kalibrierschichten	2
2.2.1	Magnesiumfluorid-Kalibrierschicht	2
2.2.2	Zinksulfid-Kalibrierschicht	2
2.3	Messung der Kalibrierschichten mittels UV-Vis Spektroskopie	2
2.4	Herstellung des Schmalbandfilters	3
2.5	Ellipsometrie	3
3	Ergebnisse und Diskussion	3
3.1	UV-Vis Spektrometrie	3
3.2	Ellipsometrie	12
3.2.1	Kalibrierung mit einem SiO ₂ /Si-Standardwafer	12
3.2.2	Messung der optischen Eigenschaften von Quarzglas	12
3.2.3	Schichtenwachstum von SiO ₂ auf Si	12
3.2.4	Schichtwachstum von Cu auf Si	14
4	Spezialfragen	15
4.1	Warum hängt der gemessene Druck bei Heiß- und Kaltkathodenröhren von der Gasart ab? Bei welcher Analysemethode trifft dieses Problem auch zu und warum?	15
4.2	Was bedeuten folgende Abkürzungen (und wie könnte die Schichtdicke gemessen werden)? XPS/ISS Tiefenprofil, SIMS, FIB/SEM, AFM, EELS . . .	16
4.2.1	XPS/ISS Tiefenprofil	16
4.2.2	SIMS	16
4.2.3	FIB/SEM	16
4.2.4	AFM	16
4.2.5	EELS	17
4.3	Gibt es auch andere Filter/Schichtsysteme? Falls ja, beschreiben Sie diese kurz!	17
4.3.1	Vergütungen	17
4.3.2	Spektralbeeinflussende optische Schichten	17
4.3.3	Polarisationsbeeinflussende optische Schichten	17

1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist die Herstellung und Charakterisierung von Dünnschichten (MgF_2 -, ZnS -Kalibrierschichten und Schmalbandfilter). Die Bestimmung der optischen Parameter und der Schichtdicken erfolgt über UV-Vis und ellipsometrische Messungen.

2 Theoretische Durchführung

Da große Teile der Apparatur zur Gasphasenabscheidung fehlen und das Ellipsometer defekt ist, wurden lediglich die UV-Vis Messungen durchgeführt. Der Ablauf der nicht durchgeführten Schritte wurde den Unterlagen [1] entnommen.

2.1 Vorbereitung

Vor Beginn muss die Apparatur auf Funktionsfähigkeit überprüft werden. Anschließend erfolgt die Evakuierung über die Vorpumpe und die Turbopumpe. Nach Erreichen des gewünschten Arbeitsdrucks kann die Heißkathoden-Druckmessröhre eingeschaltet werden.

2.2 Herstellung der Kalibrierschichten

2.2.1 Magnesiumfluorid-Kalibrierschicht

Es wird Magnesiumfluorid aufgedampft, bis der Schwingquarz eine Frequenzänderung von 6000 Hz anzeigt. Eine geeignete Aufdampfrate wird mit einem Strom von 300 A erzielt. Zu diesem Zweck wird die Apparatur bei 1,1 bis 1,7 V betrieben. Zur Einstellung der Aufdampfrate wird die Blende zum Substrat geschlossen, wodurch nur noch der Schwingquarz bedampft wird. Anschließend wird die untere Blende geschlossen, sodass kein Material den Schwingquarz und das Substrat erreicht. Vor dem Aufdampfen wird zuerst die untere Blende geschlossen, die obere Blende geöffnet und die Frequenz am Schwingquarz aufgezeichnet. Das Aufdampfen der Substrate wird durch Öffnen der unteren Blende gestartet. Ist die gewünschte Frequenzänderung von 6000 Hz erreicht, wird die untere Blende wieder geschlossen und das Aufdampfen dadurch beendet. Zur Belüftung der Apparatur, wird zuerst die Turbomolekularpumpe bei geschlossenem Ventil zur Vorpumpe abgeschaltet. Dann wird belüftet und die Glassubstrate können durch neue Substrate ausgetauscht werden.

2.2.2 Zinksulfid-Kalibrierschicht

Die Herstellung der Zinksulfid-Kalibrierschicht erfolgt nach der Arbeitsweise in Abschnitt 2.2.1, dabei werden jedoch zum Aufdampfen nur 250 A benötigt. Um eine optimale Haftung der Schicht am Glas zu erreichen, wird zuerst eine ca. 150 Hz dicke MgF_2 Schicht aufgetragen und dann werden wieder 6000 Hz Material aufgedampft.

2.3 Messung der Kalibrierschichten mittels UV-Vis Spektroskopie

Die Messungen wurden mit einem Agilent Cary 60 UV-Vis Spektrometer durchgeführt. Dieses ist mit einer Xenon-Lampe und einem Czerny-Turner Monochromator ausgestattet und deckt einen Bereich von 190 - 1100 nm ab. Die Zero- und Baseline-Korrektur wurde mit reinem Glassubstrat durchgeführt. Die Transmission des Glases wurde auf 100% normiert, dann wurde der Strahlengang blockiert um die Basislinie zu korrigieren. Die Kalibrierschichten aller Glassubstrate wurden im Bereich von 200–800 nm gemessen.

2.4 Herstellung des Schmalbandfilters

Der Schmalbandfilter wird wie unter Abschnitt 2.2.1 hergestellt. Dabei werden 16 Schichten aus abwechselnd MgF_2 und ZnS benötigt. Um eine Transmissionswellenlänge von $\lambda = 500 \text{ nm}$ zu erreichen, werden abwechselnd Schichten mit einer optischen Schichtdicke von $\frac{\lambda}{4}$ aufgetragen. In der Mitte des Schmalbandfilters befindet sich eine Doppelschicht ZnS . Die benötigte Aufdampfzeit zum Erreichen der gewünschten Schichtdicken wird über die zuvor ermittelte Frequenzänderung am Schwingquarz bestimmt. Der Schmalbandfilter wird zusätzlich über UV-Vis Spektroskopie charakterisiert.

2.5 Ellipsometrie

Die Messungen werden mit einem Horiba Jobin Yvon Ruby2000 Ellipsometer mit einem He-Ne Laser (532 nm) durchgeführt. Dabei wird einmal mit und einmal ohne Kompensator im Strahlengang gemessen. Der Einfallswinkel beträgt 55° (nahe dem Brewsterwinkel) und der Polarisator ist auf 45° eingestellt. Die Auswertung erfolgt mit den Programmen CPSE-TUPMACHINE und CPUICONTROL. Der Kollimator muss nach jedem Probenwechsel neu eingestellt werden. Die Kalibrierung erfolgt mit einem SiO_2/Si -Standardwafer. Zur Bestimmung der optischen Eigenschaften von Quarzglas wird die Rückseite des Quarzglases aufgeraut, um Transmission an der Luft/Glas-Grenzfläche zu verhindern. Anschließend werden die Dicken der SiO_2 -Schichten und das Wachstum von Cu-Schichten auf einem Si-Einkristall gemessen. Für die Messung des Cu-Wachstums muss die SiO_2 Schicht zuerst mit NH_3 -gepufferter Flusssäure entfernt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 UV-Vis Spektrometrie

Die unter Abschnitt 2.3 beschriebene Nulllinien- und Basislinienkorrektur wurde anhand eines unbeschichteten Glassubstrats überprüft, Abbildung 1. Es wird ersichtlich dass die gemessenen Transmissionswerte unterhalb von 300 nm stark von den erwarteten 100 % abweichen. Grund dafür ist die UV-Absorption des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs. Für geringe absolute Transmission, sprich Werten nahe von 0 %, ergibt die Korrektur dramatische Schwankungen. Aus diesem Grund wurden die nachfolgenden Spektren für Wellenlängen größer 300 nm ausgewertet.

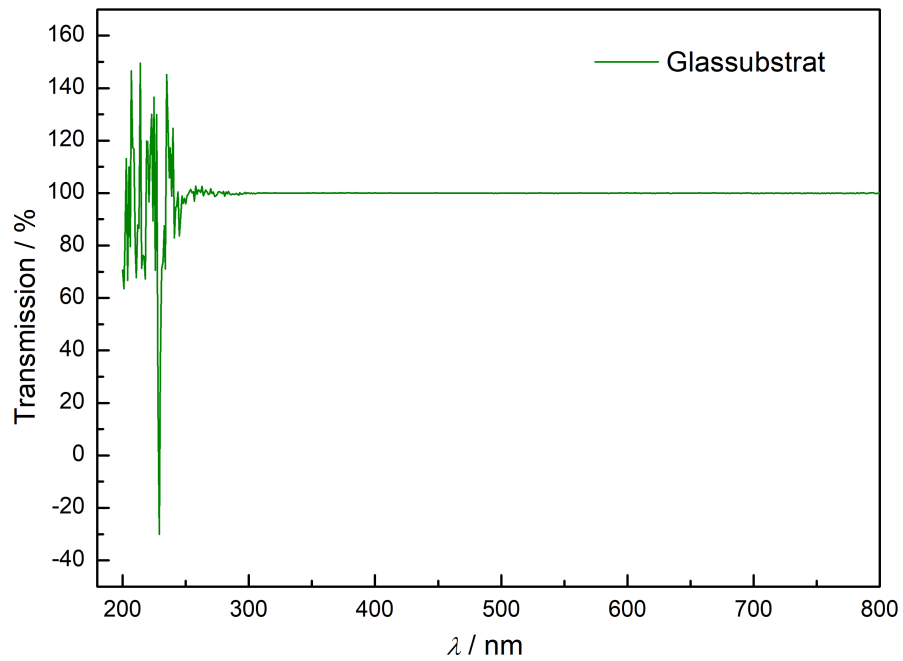


Abbildung 1: UV-Vis Spektrum des unbeschichteten Glassubstrats.

Zur Bestimmung der Schichtdicken der ZnS- und MgF_2 -Kalibrierschichten, wurden je Substanz zwei beschichtete Substrate gemessen. Die erhaltenen Spektren sind in Abbildung 2 und 3 gezeigt.

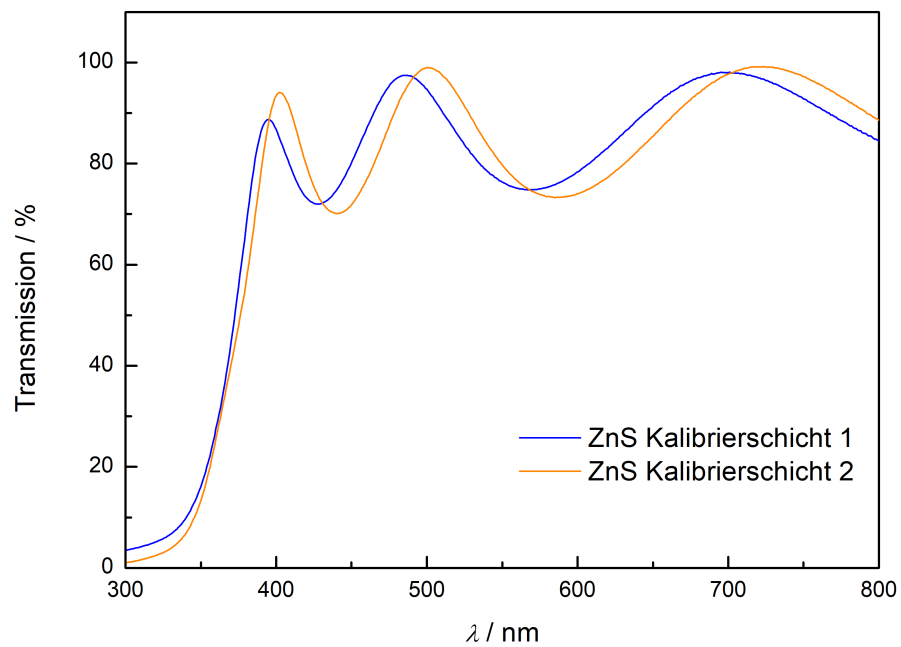


Abbildung 2: UV-Vis Spektrum der beiden ZnS Kalibrierschichten.

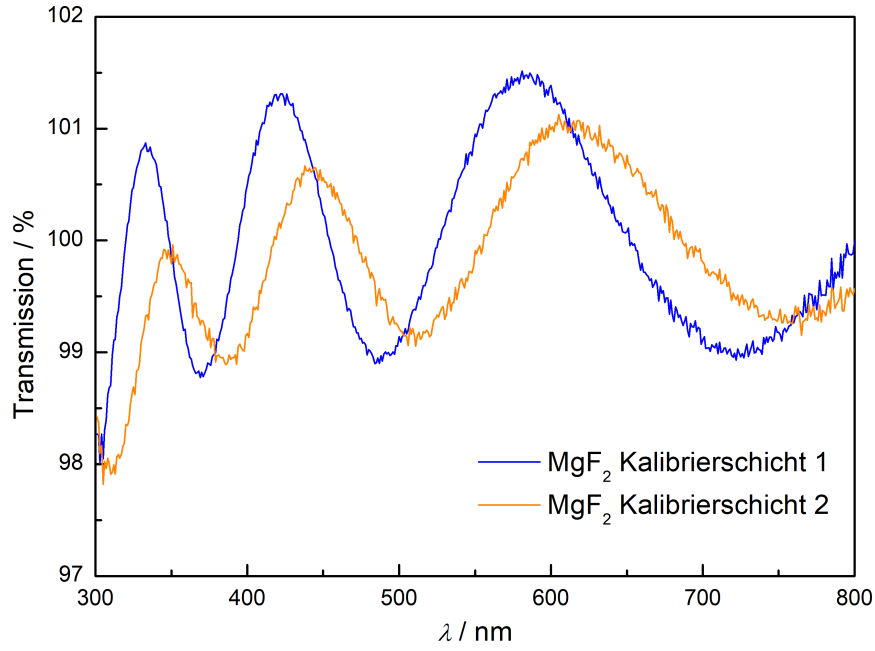


Abbildung 3: UV-Vis Spektrum der beiden MgF_2 Kalibrierschichten.

Zur Berechnung der optischen Schichtdicke werden die wellenlängenabhängigen Brechungsindizes an den Transmissionsmaxima und -minima benötigt. Zu diesem Zweck wurden die im Praktikumsskript enthaltenen Brechungsindizes von Zinksulfid und Magnesiumfluorid, Tabelle 1, geplottet und ein exponentieller Fit an die Datenpunkte angelgt, Abbildung 4 und 5 [1].

Tabelle 1: Wellenlängenabhängige Brechungsindizes von ZnS und MgF_2 [1].

λ / nm	n_{ZnS}	n_{MgF_2}
300		1.4054
350		
400		1.3959
450	2.473	
500	2.419	1.3917
550	2.386	
600	2.363	1.3893
650	2.345	
700	2.332	1.3878
750	2.322	
800	2.313	1.3867
850	2.306	
900	2.301	1.3859
950		
1000		1.3852

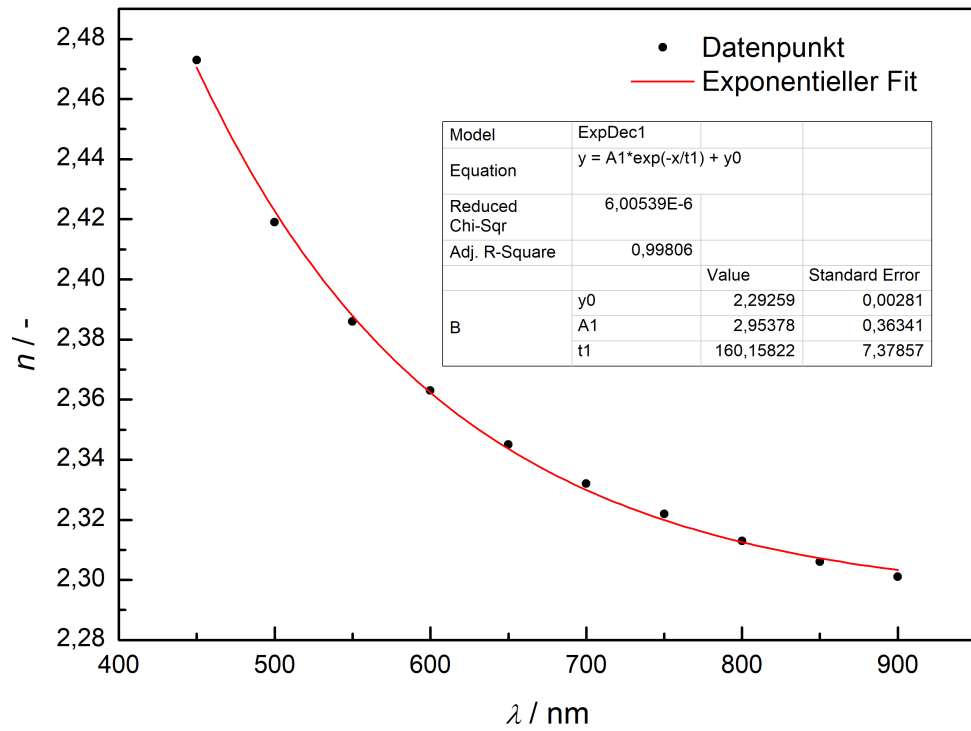


Abbildung 4: λ -abhängige Brechungsindizes von ZnS mit exponentiellem Fit.

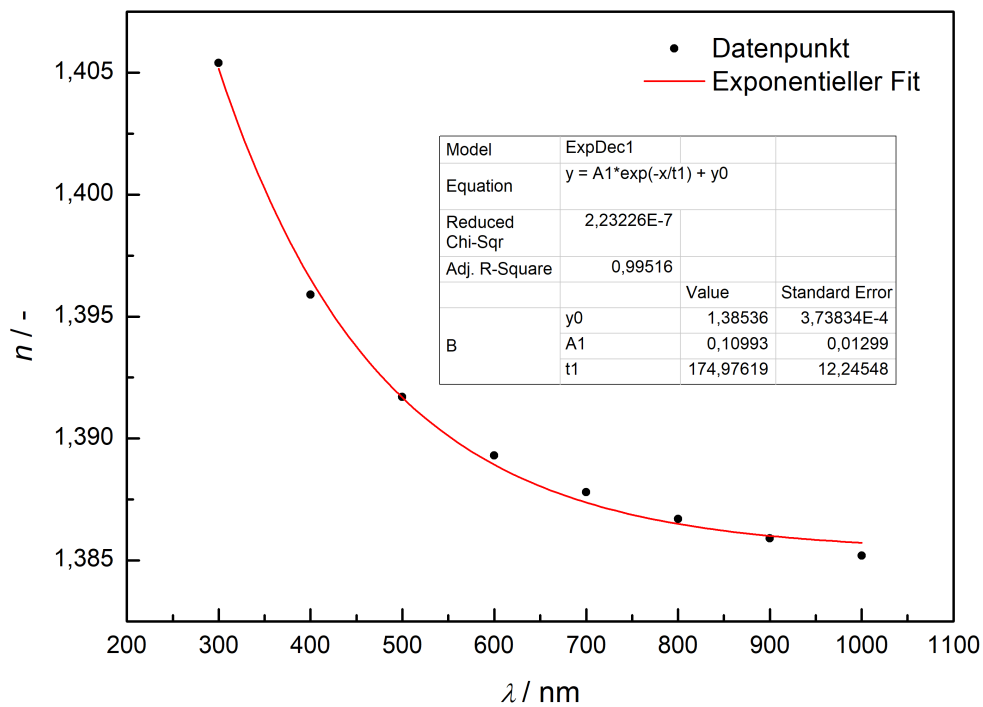


Abbildung 5: λ -abhängige Brechungsindizes von MgF_2 mit exponentiellem Fit.

Die Minima und Maxima der Transmission von den Kalibrierschichten, Abbildung 2 und 3, wurden händische abgelesen. Über die Fitkurven in Abbildung 4 und 5 können die

zugehörigen Brechungsindizes n nach Gleichung 1 berechnet werden. Die verwendeten Fitparameter sind ebenfalls in den Abbildungen 4 und 5 enthalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-5 gelistet.

$$n = y_0 + A1 \cdot e^{-\frac{\lambda}{t1}} \quad (1)$$

Gleichungen 2 und 3 zeigen die Bedingung für das auftreten konstruktiver, beziehungsweise destruktiver Interferenz bei der Transmission an Zinksulfid. Durch gleichsetzen der geometrischen Schichtdicke d_{geo} und Umformung, kann die Beugungsordnung m_{ZnS} bestimmt werden, Gleichung 4. Analog zeigen Gleichung 5 und 6 die Zusammenhänge für konstruktive und destruktive Interferenz bei der Transmission durch Magnesiumfluorid. Erneut kann durch gleichsetzen und Umformung die Beugungsordnung für die MgF_2 Schicht m_{MgF_2} bestimmt werden, Gleichung 7. Die berechneten Beugungsordnungen benachbarter Maxima und Minima sind in Tabelle 2-5 gezeigt.

$$n_{\text{ZnS}} \cdot d_{\text{geo}} = 2m \cdot \frac{\lambda_{\text{max}}}{4} \quad (2)$$

$$n_{\text{ZnS}} \cdot d_{\text{geo}} = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda_{\text{min}}}{4} \quad (3)$$

$$m_{\text{ZnS}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{min}}}{n_{\text{min}}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{max}}}{n_{\text{max}}} - \frac{\lambda_{\text{min}}}{n_{\text{min}}} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$n_{\text{MgF}_2} \cdot d_{\text{geo}} = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda_{\text{max}}}{4} \quad (5)$$

$$n_{\text{MgF}_2} \cdot d_{\text{geo}} = 2m \cdot \frac{\lambda_{\text{min}}}{4} \quad (6)$$

$$m_{\text{MgF}_2} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{max}}}{n_{\text{max}}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{min}}}{n_{\text{min}}} - \frac{\lambda_{\text{max}}}{n_{\text{max}}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Weiters kann aus den Beugungsordnungen und der Wellenlänge eines Extremums die entsprechende geometrische Schichtdicke d_{geo} bestimmt werden. Dazu werden die zugehörigen Gleichungen 2 und 3 für ZnS und die Gleichungen 5 und 6 für MgF_2 herangezogen. Die Ergebnisse und der arithmetische Mittelwert der Schichtdicke jeder Kalibrierschicht sind erneut in Tabelle 2-5 gelistet.

Tabelle 2: Maxima und Minima der Transmission mit zugehörigem Brechungsindex, Beugungsordnung und resultierender Schichtdicke für die 1. ZnS-Kalibrierschicht.

Extremum	λ / nm	n_{ZnS}	m	d_{geo} / nm
Maximum	395	2.54	4	311
Minimum	428	2.50	3	300
Maximum	486	2.43	3	299
Minimum	570	2.38	2	300
Maximum	701	2.33	2	301
Mittelwert:				302

Tabelle 3: Maxima und Minima der Transmission mit zugehörigem Brechungsindex, Beugungsordnung und resultierender Schichtdicke für die 2. ZnS-Kalibrierschicht.

Extremum	λ / nm	n_{ZnS}	m	d_{geo} / nm
Maximum	402	2.53	4	317
Minimum	441	2.48	3	311
Maximum	501	2.42	3	310
Minimum	585	2.37	2	309
Maximum	723	2.32	2	311
Mittelwert:				312

Tabelle 4: Maxima und Minima der Transmission mit zugehörigem Brechungsindex, Beugungsordnung und resultierender Schichtdicke für die 1. MgF₂-Kalibrierschicht.

Extremum	λ / nm	n_{MgF_2}	m	d_{geo} / nm
Maximum	333	1.40	5	535
Minimum	369	1.40	4	528
Maximum	422	1.40	4	529
Minimum	487	1.39	3	525
Maximum	583	1.39	3	525
Minimum	722	1.39	2	520
Mittelwert:				527

Tabelle 5: Maxima und Minima der Transmission mit zugehörigem Brechungsindex, Beugungsordnung und resultierender Schichtdicke für die 2. MgF₂-Kalibrierschicht.

Extremum	λ / nm	n_{MgF_2}	m	d_{geo} / nm
Maximum	348	1.40	5	559
Minimum	386	1.40	4	552
Maximum	441	1.39	4	554
Minimum	511	1.39	3	551
Maximum	612	1.39	3	551
Minimum	759	1.39	2	547
Mittelwert:				552

Die Mittelwerte der Schichtdicken $d_{\text{geo, Mittel}}$ sind in Tabelle 6 und 7 zusammengefasst. Die jeweils gemessene Frequenzänderung am Schwingquarz $\Delta\nu$ und die daraus resultierenden Aufdampfraten $\Delta d/\nu$ sind ebenfalls tabelliert. Die auftretenden Abweichungen zwischen den einzelnen Kalibrierschichten einer Substanz könnten durch ungleichmäßiges Aufdampfen zu erklären sein. Eine weitere Fehlerquelle ist das händische Ablesen der Transmissionsmaxima und -minima, welches mit einer gewissen Ungenauigkeit einhergeht. Außerdem wurden die Schichten nicht neu hergestellt, sondern bereits seit einigen Jahren gelagert.

Tabelle 6: Mittelwerte der geometrischen Schichtdicken, zugehörige Frequenzänderung des Schwingquarz und entsprechende Aufdampfrate für die ZnS-Kalibrierschichten.

# Schicht	$d_{\text{geo, Mittel}}$ / nm	$\Delta\nu$ / Hz	$\Delta d/\nu$ / nm/Hz
1	302	6214	0.0486
2	312	6214	0.0502
Mittelwert	307	6214	0.0494

Tabelle 7: Mittelwerte der geometrischen Schichtdicken, zugehörige Frequenzänderung des Schwingquarz und entsprechende Aufdampfrate für die MgF₂-Kalibrierschichten.

# Schicht	$d_{\text{geo, Mittel}}$ / nm	$\Delta\nu$ / Hz	$\Delta d/\nu$ / nm/Hz
1	527	6098	0.0864
2	552	6098	0.0906
Mittelwert	540	6098	0.0885

Da der Schmalbandfilter nicht selbst hergestellt, sondern zur Verfügung gestellt wurde, kann das Transmissionsmaximum λ_0 mit 509 nm aus dem UV-Vis Spektrum abgelesen werden, Abbildung 6. Nach Gleichung 8 ergibt sich für die optische Schichtdicke einer ZnS-, beziehungsweise MgF₂-Schicht d_{opt} ein Wert von 127 nm. Die Berechnung der zugehörigen geometrischen Schichtdicken d_{geo} erfolgt nach Gleichung 9. Da hierfür die wellenlängenabhängigen Brechungsindizes n benötigt werden, werden diese nach Gleichung 1 mit den Parametern aus Abbildung 4 und 5 für ZnS und MgF₂ berechnet. Mit diesen Daten kann die benötigte Frequenzänderung am Schwingquarz $\Delta\nu$, um die gewünschte geometrische Schichtdicke aufzudampfen, bestimmt werden, Gleichung 10. Die Ergebnisse obiger Rechnungen sind in Tabelle 8 angeführt. Das UV-Vis Spektrum des Schmalbandfilters, Abbildung 6, zeigt im Bereich von 350 bis 430 nm und oberhalb von 650 nm eine deutlich erhöhte Transmission des Lichts. Grund dafür könnte das nicht exakte Aufdampfen der ZnS- und MgF₂-Schichten bezogen auf die Änderung der Frequenz des Schwingquarz sein. Eine weitere mögliche Ursache könnten Verunreinigungen an der gemessenen Stelle des Schmalbandfilters sein.

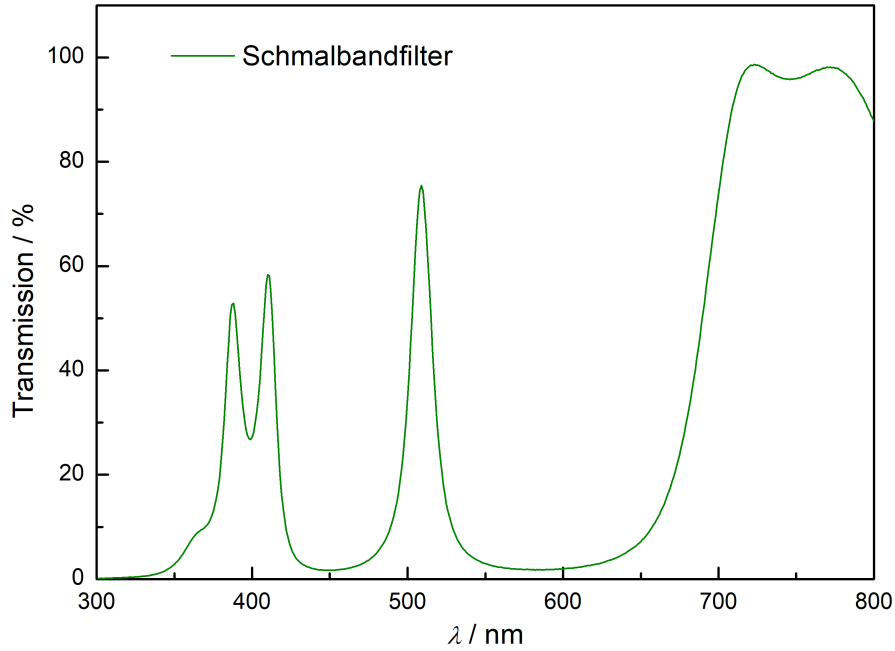


Abbildung 6: UV-Vis Spektrum des Schmalbandfilters.

$$d_{\text{opt}} = \frac{\lambda_0}{4} \quad (8)$$

$$d_{\text{geo}} = \frac{d_{\text{opt}}}{n} \quad (9)$$

$$\Delta\nu = \frac{d_{\text{geo}}}{\Delta d/\nu} \quad (10)$$

Tabelle 8: Geometrische Schichtdicke d_{geo} und benötigte Frequenzänderung des Schwingquarz $\Delta\nu$ zur Herstellung einer ZnS- und MgF_2 -Schicht des Schmalbandfilters.

Schichttyp	d_{opt} / nm	n	d_{geo} / nm	$\Delta d/\nu$ / nm/Hz	$\Delta\nu$ / Hz
ZnS	127	2.42	52.7	0.0494	1067
MgF_2	127	1.39	91.5	0.0885	1034

Damit besitzt eine Zinksulfidschicht eine geometrische Dicke von 52.7 nm und eine Magnesiumfluoridschicht eine geometrische Dicke von 91.5 nm. Für das Aufdampfen der ZnS-Schicht muss sich die Frequenz des Schwingquarz um 1067 Hz ändern. Im Falle der MgF_2 -Schicht ist eine Frequenzänderung von 1034 Hz nötig. Zu berücksichtigen ist, dass in der Mitte des Schmalbandfilters eine Doppelschicht ZnS mit einer Dicke von 105 nm aufgedampft werden muss. Dies entspricht einer Änderung der Schwingfrequenz von 2133 Hz.

Zur Bestimmung der Peakhalbwertsbreite FWHM und der Höhe des Transmissionmaximums, wurde das UV-Vis Spektrum aus Abbildung 6 im Bereich von 440-608 nm geplottet und eine Gauss Kurve gefittet, zu sehen in Abbildung 7. Die Halbwertsbreite des Peaks liegt bei 18.4 nm und die Höhe bei 67.7 nm.

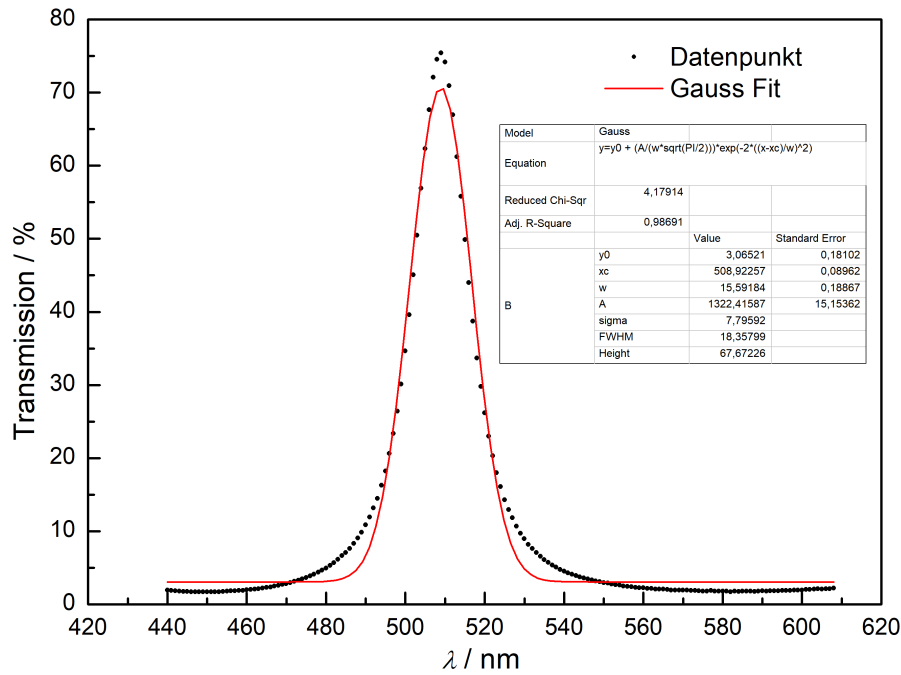


Abbildung 7: UV-Vis Spektrum des Schmalbandfilters im Bereich des Transmissionsmaximums von 440-608 nm, inklusive Gauss Fit an die Datenpunkte.

3.2 Ellipsometrie

3.2.1 Kalibrierung mit einem SiO₂/Si-Standardwafer

Die SiO₂ Filmdicke auf dem für die Kalibrierung verwendeten Si Wafer ist bekannt und beträgt 101.5 nm. Die Messung wurde mit den Parametern in Tabelle 9 durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 10 enthalten.

Tabelle 9: Parameter für die Kalibriermessung.

$n_{\text{SiO}_2\text{-Schicht}}$	$k_{\text{SiO}_2\text{-Schicht}}$	$n_{\text{Si-Wafer}}$	$k_{\text{Si-Wafer}}$
1.465	0	3.865	-0.02

Tabelle 10: Messwerte der Kalibriermessung.

$\Psi / ^\circ$	$\Delta / ^\circ$	Filmdicke / nm	Period. Filmdicke / nm
46.3995	129.9921	103.8444	260.5006

Die gemessene Dicke der SiO₂ Schicht ist um 2.3 nm größer als der angegebene Wert. Dies entspricht ungefähr einem Fehler von 2 %. Mögliche Ursachen für den Fehler könnten unterschiedliche Bedingungen während der Referenzmessung sein, wie etwa unterschiedliche Temperatur, Einfallswinkel, Feuchtigkeit und Wellenlänge.

3.2.2 Messung der optischen Eigenschaften von Quarzglas

Nach der Kalibrierung wurden der Brechungsindex n , der Extinktionskoeffizient k und die ellipsometrischen Winkel Ψ und Δ für reines Quarzglas gemessen (siehe Tabelle 11) und mit gegebenen Sollwerten verglichen. Die Sollwerte für Quarzglas betragen $n = 1.5163$ und $k = 0$.

Tabelle 11: Messwerte für reines Quarzglas.

$\Psi / ^\circ$	$\Delta / ^\circ$	$n_{\text{SiO}_2\text{-Glas}}$	$k_{\text{SiO}_2\text{-Glas}}$	Reflektivität / %
2.1092	160.1683	1.4973	-0.0263	3.98

Die gemessenen Werte weichen etwas von den erwarteten Werten ab ($\Delta n_{\text{SiO}_2} = 0.0190$ und $\Delta k = 0.0263$). Zwei mögliche Gründe für diese Abweichungen sind Inhomogenität in der Dicke und Reflexion an der Rückseite und des Quarzglases. Die Reflexion an der Rückseite des Glases kann durch schwärzen oder aufrauen mit Sandpapier minimiert werden. Dadurch ist die Dicken-Inhomogenität des Glases die plausibelste Ursache für die Abweichungen der Werte.

3.2.3 Schichtenwachstum von SiO₂ auf Si

Wenn reines Si mit Luft in Berührung kommt bilden sich SiO₂ Passivierungsschichten. Zur Ermittlung der Dicken der SiO₂-Schichten auf Si wurden 11 Proben mit den Para-

metern in Tabelle 12 gemessen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 13 angeführt. Da auch hier das Problem der Periodizität der Schichtdicken auftritt, wurde ein Ausgangswert von 260.5006 nm für die periodische Filmdicke vorgegeben.

Tabelle 12: Verwendete Parameter für die Messung von SiO_2 -Schichten auf Si.

$n_{\text{SiO}_2\text{-Schicht}}$	$k_{\text{SiO}_2\text{-Schicht}}$	$n_{\text{Si-Wafer}}$	$k_{\text{Si-Wafer}}$	Period. Filmdicke / nm
1.465	0	3.865	-0.02	260.5006

Tabelle 13: Messergebnisse von SiO_2 -Schichten auf Si.

# Schicht	$\Psi / ^\circ$	$\Delta / ^\circ$	Filmdicke / nm
1	28.8479	175.8536	5.2826
2	29.0279	162.821	23.0023
3	31.0877	144.2351	51.4055
4	33.9705	133.7574	72.7511
5	39.7496	128.3295	92.0783
6	45.7468	130.2244	103.0242
7	29.5879	196.2043	238.0943
8	31.675	222.8127	197.2465
9	55.5865	217.5981	144.2024
10	42.7681	129.0558	98.157
11	30.8323	146.1734	48.1613

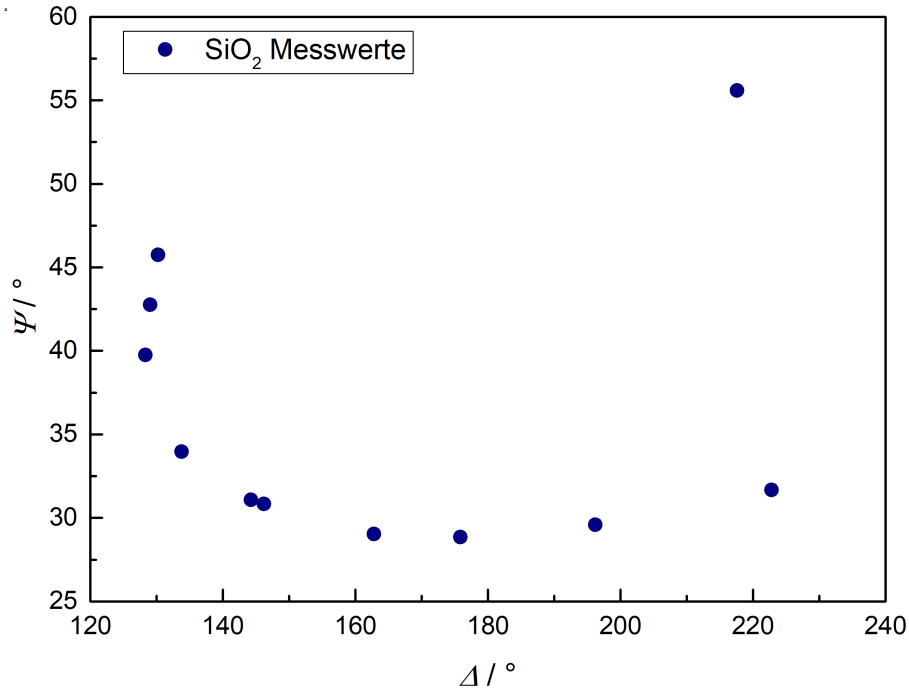


Abbildung 8: Graph der ellipsometrischen Messung von SiO_2 -Schichten auf Si.

Die Messpunkte in Abbildung 8 scheinen eine elliptische Form zu haben. Wird die Messung nur unter einem Einfallswinkel durchgeführt, können Inhomogenitäten in der Dicke der Probe sowie die Reflexion auf der Rückseite zu falschen bzw. ungenauen Werten führen. Um solche Fehler zu vermeiden sollte daher idealerweise die gleiche Messung bei verschiedenen Einfallswinkeln durchgeführt werden.

3.2.4 Schichtwachstum von Cu auf Si

Zum Schluss wurde das Wachstum von 7 Cu/Si Proben unter Verwendung der Parameter in Tabelle 14 untersucht. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 15 angeführt. Als periodische Filmdicke wurde ein Wert von 140.6542 nm vorgegeben.

Tabelle 14: Verwendete Parameter für die Messung von Cu-Schichten auf Si.

n_{Cu}	k_{Cu}	$n_{\text{Si-Wafer}}$	$k_{\text{Si-Wafer}}$	Period. Film / nm
3.147	-0.39	3.865	-0.02	140.6542

Im Vergleich zu den Punkten in Abbildung 8 bilden die Messpunkte in Abbildung 9 nicht wirklich eine Ellipse. Mit viel Fantasie kann eine sehr viel schmalere Ellipse erkannt werden. Das Wachstum von transparenten Schichten wie SiO_2 ist im Allgemeinen viel einfacher zu charakterisieren als das Wachstum von Licht absorbierenden Schichten wie Cu und den meisten anderen Metallen. Wegen der absorbierenden Eigenschaften sollten solche Materialien generell als sehr dünne Schicht vorliegen. Des Weiteren geht die Reflexion an Metallen wie Cu mit einer starken Intensitätsabnahme einher, wodurch die Schichtdickenmessung weiter limitiert wird [2].

Tabelle 15: Messergebnisse von Cu-Schichten auf Si.

# Schicht	$\Psi / ^\circ$	$\Delta / ^\circ$	Filmdicke / nm
1	26.6578	192.6065	1.2458
2	36.1529	167.9747	11.3257
3	40.5495	147.5130	25.6165
4	40.8345	133.7104	22.4372
5	42.0260	129.6089	21.2457
6	41.5886	130.7363	24.9721
7	29.5510	175.9557	56.1475

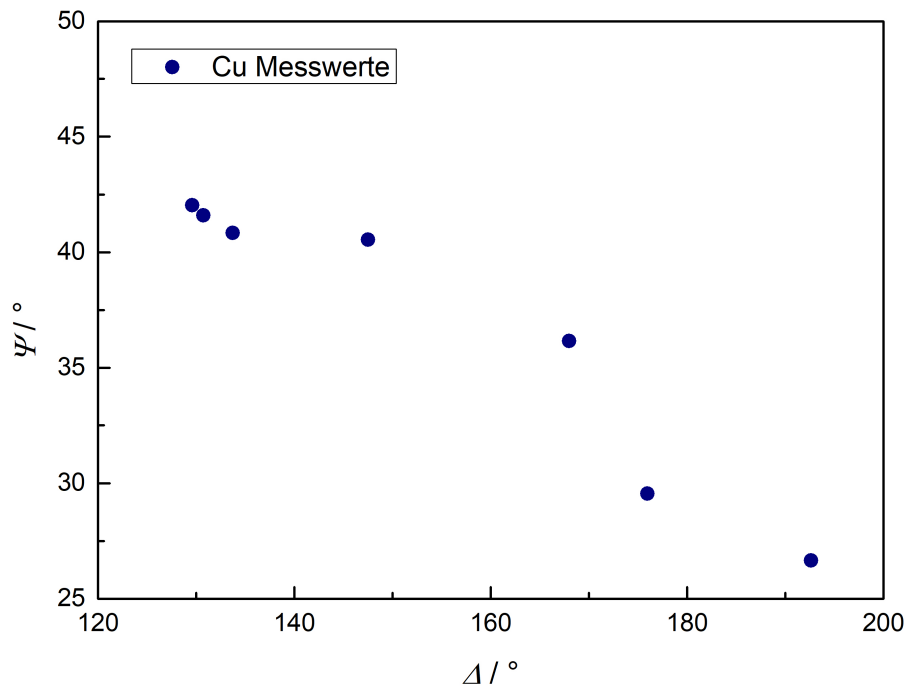


Abbildung 9: Graph der ellipsometrischen Messung von Cu-Schichten auf Si.

4 Spezialfragen

4.1 Warum hängt der gemessene Druck bei Heiß- und Kaltkathodenröhren von der Gasart ab? Bei welcher Analysemethode trifft dieses Problem auch zu und warum?

Bei Kathodenröhren werden Gasmoleküle durch Elektronen ionisiert. Der dabei entstehende Gasentladungsstrom wird an einem Kollektor gemessen. Über diesen Kollektorstrom wird der Druck bestimmt. Der gemessene Druck ist proportional zur Anzahl an ionisierten Gasmolekülen. Es muss berücksichtigt werden, dass der Ionenstrom von der Art der Ionen abhängt. Unterschiedliche Ionen besitzen eine unterschiedliche Ionisierungswahrscheinlichkeit und damit einen anderen Anzeigedruck bei gleichem Realdruck. Daher muss diese Ionisierungswahrscheinlichkeit als Faktor bei der Berechnung des Drucks berücksichtigt werden.

Dieses Problem der gasartabhängigen Ionisierungswahrscheinlichkeiten tritt auch bei der

Massenspektroskopie auf. Bei der Elektronenstoßionisation in einem Massenspektrometer werden die Ionen auf die selbe Art erzeugt wie bei einem Kathodenrohr. Elektronen erzeugen bei der Kollision mit den Gasmolekülen Ionen. Im Spektrum werden nur die geladenen Ionen aufgezeichnet. Ionen von gewissen Komponenten können außerdem noch fragmentieren (Kohlenwasserstoffe), dabei entstehen Molekül-spezifische Fragmentierungsmuster. [3]

4.2 Was bedeuten folgende Abkürzungen (und wie könnte die Schichtdicke gemessen werden)? XPS/ISS Tiefenprofil, SIMS, FIB/SEM, AFM, EELS

4.2.1 XPS/ISS Tiefenprofil

XPS steht für X-ray photoelectrone spectroscopy, ISS ist die Ionen Streuspektroskopie. Mit Röntgenstrahlung werden kernnahe Elektronen aus Atomen bzw. Atomverbänden herausgelöst. Anschließend wird die kinetische Energie des emittierten Elektrons gemessen und daraus die Bindungsenergie berechnet. Daraus resultiert eine qualitative Information über eine Probe (also Atom, Orbital und chemische Umgebung) ohne dabei diese zu beschädigen. Zur Bestimmung der Schichtdicke wird das Verhältnis der Emissionslinie des reinen und des bedeckten Substrates betrachtet. Die herausgeschlagenen Elektronen aus dem Substrat müssen einen zusätzlichen Weg durch die Schicht zurücklegen. Diese nehmen bei steigender Schichtdicke exponentiell zur Schichtdicke ab. Diese Messung wird auch Sputtertiefenprofil genannt.

Bei ISS (Ion Scattering Spectroscopy) wird eine Probe mit Edelgas- oder Alkaliionen beschossen. Anhand des Streuwinkels und der Energie des gestreuten Ions kann bestimmt werden, welches Atom vorhanden ist (Masse kann berechnet werden) und wie die Oberfläche beschaffen ist. [4]

4.2.2 SIMS

SIMS steht für Sekundärionen-Massenspektrometrie. Eine Oberfläche wird mit einem Ionenstrahl Schicht für Schicht abgetragen. Dadurch wird die Dicke des Films bestimmt. Die Bestandteile können mithilfe eines Massenspektrometers analysiert werden. [5]

4.2.3 FIB/SEM

FIB/SEM ist die Abkürzung für Focused Ionbeam/Rasterelektronenmikroskopie. Hierbei werden Ionen über elektrostatische Linsen gebündelt und zur Probe hin beschleunigt. Bei FIB wird die Probe auseinandergeschnitten und das dabei entstehende Profil wird mit Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie kann die Elementarverteilung betrachtet werden.

Bei der Rasterelektronenmikroskopie wird die Oberfläche mit Hilfe feingebündelter Elektronenstrahlen abgerastert. Von der Probe freigesetzte Elektronen geben über einen Detektor ein Bild wieder. Dabei gilt, je feiner das Raster, desto höher die Auflösung des entstandenen Bildes. [6]

4.2.4 AFM

Durch mechanische Wechselwirkungen zwischen einer feinen Spitze eines Biegebalkens des Rasterkraftmikroskops (AFM - atomic force microscopy) und der Probenfläche kann die Oberflächentopographie durch auftretende Verbiegungsänderung bestimmt werden. Ein

Nachteil dieser Methode ist, dass die qualitative Bestimmung des Films nicht möglich ist. Bei lateral force microscopy beziehungsweise den Sekundärmethoden von AFM ist die qualitative Bestimmung hingegen möglich.[7]

4.2.5 EELS

Bei EELS (Elektronen Energieverlust Spektroskopie) durchstrahlen hochenergetische Elektronen eine dünne Probe und werden durch Atome inelastisch gestreut, wodurch sie Energie verlieren. Dabei sind die jeweiligen Ionisationskonstanten spezifisch für das Atom (anheben auf höheres Energieniveau), wodurch eine Identifizierung möglich ist.[8]

4.3 Gibt es auch andere Filter/Schichtsysteme? Falls ja, beschreiben Sie diese kurz!

Optische Schichten werden zur Lösung einer Vielzahl von Aufgaben der angewandten modernen Optik eingesetzt. Optische Schichten können in Vergütungen sowie spektral- und polarisationsbeeinflussende Schichten eingeteilt werden.[9]

4.3.1 Vergütungen

Vergütungen haben das Ziel, die Reflexion und Transmission von optischen Funktionsflächen in einem definierten Spektralbereich einem Extremwert anzunähern (Ver- und Entspiegelung).

Bei Verspiegelungen werden hochreflektierende Beschichtungen verwendet. Diese maximieren die Reflexion und minimieren die Transmission in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Die Unterscheidung erfolgt bei Verspiegelung nach der Anordnung der Verspiegelungsschicht (Vorder oder Rückseite), nach dem verwendeten Material, der spektralen Breite der Reflexion (Schmalband oder Breitbandspiegel) und nach dem Reflexionsgrad, wie Vollspiegel, Teilspiegel (Neutralteiler, Strahlteiler, Auskoppelspiegel, Graufilter) und Spiegel mit kontrolliertem Phasenverlauf (CO₂-Laserspiegel, Geschirpte Spiegel).

Bei Entspiegelungen werden Antireflexbeschichtungen verwendet, welche die Reflexion unterdrücken und so die Transmission in einem bestimmten Wellenlängenbereich erhöhen. Die Verminderung der Reflexion wird durch destruktive Interferenz der reflektierenden Strahlen erreicht. Antireflexbeschichtungen sind für optische Systeme mit einer hohen Glas-Luft-Grenzfläche und IR-optische Systeme von hoher Bedeutung. Entspiegelungen können sowohl einfach als auch mehrfach beschichtet sein.

4.3.2 Spektralbeeinflussende optische Schichten

Dabei handelt es sich um optische Bauelemente, die in einem definierten Spektralbereich eine hohe Transmission und im restlichen Bereich eine hohe Reflexion und/oder Absorption aufweisen (Interferenzfilter, Spektralfilter, dichroitische Teiler). Kantenfilter teilen polychromatisches Licht in einen langwelligen und einen kurzwelligen Anteil, wobei der eine mit einem hohen Transmissionsgrad durchgelassen und der andere reflektiert und/oder absorbiert wird. Rugate Filter sind Wechselschichtsysteme mit einer sinusförmigen Variation der Brechzahlen. Diese unterdrücken alle Interferenzordnungen größer als 1.

4.3.3 Polarisationsbeeinflussende optische Schichten

Diese sind Schichtsysteme, die einen Polarisationszustand des Lichtes in einen anderen überführen. Lineare Polarisatoren wandeln Licht mit einem beliebigen Polarisationszu-

stand in linear polarisiertes Licht um (Schichtpolarisatoren, Interferenzpolarisatoren).

Literatur

- (1) Winkler, D.; Grießer, C. Praktikumsskript: Dünnschichttechnologie, Gasphasenabscheidung, 2021.
- (2) Frenzel, M. Ellipsometrische Bestimmung der Dicke und Brechzahl dünner Schichten auf Silizium. *Kristall und Technik* **1969**, 4, 149–160, DOI: 10.1002/crat.19690040119.
- (3) Klötzer, B.; Werner, D. QuantitativeAnalyseQMS SS22, 2022.
- (4) J.Chastain, R., *Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy*; Physical Electronics.
- (5) T., M. Organische Strukturchemie II, 2022.
- (6) Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Focused_Ion_Beam, 01.06.2022.
- (7) nanoandmore, <https://www.nanoandmore.com/what-is-atomic-force-microscopy?gclid=CjwKCAjwv-GUBhAzEiwASUMm4tsP8m-Lo8xQQed7LkXDt7riImWwkArcrLFwt9X3bwQx6U9vHy8HWRcBwE>, 01.06.2022.
- (8) Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_energy_loss_spectroscopy, 01.06.2022.
- (9) Lexikon der Optik - optische Schichten, <https://www.spektrum.de/lexikon/optik/optische-schichten/2332/>, 18.05.2022.