

Hahn-Meitner-Institut Berlin
Silizium Photovoltaik SE1
Prof. Dr. W. Fuhs

Betreuer: Dr. F. Fenske
Bearbeitungszeitraum: 01.03.2003 bis 30.04.2003

Philipp Plänitz

Praktikumsbericht

Optimierung der optischen Transparenz und der elektrischen Leitungseigenschaften von TCO-Schichten mittels statistischer Versuchsplanung

TCO-Schichten haben die, für viele Applikationen vorteilhafte Eigenschaft einer hohen Transparenz und Leitfähigkeit. Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung von TCO-Schichten mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung. Die Anwendung dieser Methode ist sinnvoll da bedingt durch den Herstellungsprozess ein großer Parameterraum entsteht und somit die Anzahl der Versuche innerhalb der Optimierung schnell hohe Werte annimmt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Verfahren zur Herstellung der TCO-Schichten	7
3	Theoretische Grundlagen zur Charakterisierung von dünnen TCO-Schichten	9
3.1	Spektralabhängige Messung der optischen Transmission	9
3.2	Messung des Schichtwiderstandes mittels Vierspitzenmethode	11
4	Versuchsdurchführung	13
4.1	Präparation der TCO-Schichten	13
4.2	Transmissionsmessung	13
4.3	Leitfähigkeitsmessung	13
4.4	Schichtdickenbestimmung	15
4.5	Zusammenführung der Daten in einer zentralen Datei	15
5	Versuchsplanung	17
5.1	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	17
5.2	D-optimaler Versuchsplan	17
5.3	„figure of merit“	18
6	Ergebnisse	19
7	Zusammenfassung	21
	Abbildungsverzeichnis	23
	Literaturverzeichnis	25

Kapitel 1

Einleitung

TCO-Schichten¹ haben die, für viele Applikationen vorteilhafte Eigenschaft einer hohen Transparenz und Leitfähigkeit. Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung von TCO-Schichten mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung. Die Anwendung dieser Methode ist sinnvoll da bedingt durch den Herstellungsprozess ein großer Parameterraum entsteht und somit die Anzahl der Versuche innerhalb der Optimierung schnell hohe Werte annimmt.

Allerdings treten durch die stat. Versuchsplanung auch Probleme auf. Einige der zu untersuchenden Depositionsparameter haben innerhalb bestimmter Grenzen einen starken Einfluss auf die Schichteigenschaften. Dadurch wird eine Modellierung über den gesamten Parameterraum schwierig. Aus diesem Grunde sollte ein schrittweises Herangehen erfolgen:

1. Bestimmung des signifikanten Parameterraumes durch Vorversuche
2. Charakterisierung der Abhängigkeit der Transmissionseigenschaften von den Depositionsparameter innerhalb des festgelegten Bereichs
3. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse weiteres Vorgehen nach der statistischen Versuchsplanung

Als TCO-Material wurde Zinkoxid mit Aluminium als Dotand verwendet. Die Deposition erfolgte mittels reaktivem Magnetronspütern.

¹transparente leitfähige Schicht, engl.: (T)ransparent (C)onducting (O)xide

Kapitel 2

Verfahren zur Herstellung der TCO-Schichten

Die Kathodenzerstäubung¹ gehört ihrem Wesen nach zu den PVD-Methoden² wie das Aufdampfen, das Inonenplattieren und das Ionenimplantieren. Das Prinzip des 1857 von Plücker erstmals zur Erzeugung dünner Schichten angewandten Verfahrens beruht auf dem Beschuß des zu zerstäubenden Materials³ mit dem elektrischen Feld beschleunigten, energiereichen Gasinonen. Dadurch werden Oberflächenatome herausgeschlagen, die sich auf der zu beschichtenden Fläche⁴ niederschlagen und so eine Oberflächenschicht bilden.

Die zur Erzeugung der Gasionen erforderlichen Glimmentladungen können, entsprechendes Vakuum vorausgesetzt, sowohl mit einer Gleichspannung als auch mit einer hochfrequenten Wechselspannung unterhalten werden. Im ersten Fall spricht man von D.C. - sonst von H.F. - Sputtern. Mischt man zum inerten Restgas reaktive Gase (zum Beispiel: O_2 , N_2 , H_2S) lassen sich durch Reaktion des Targetmaterials mit dem Gas aus Elementen Verbindungsschichten aufstäuben. In diesem Fall spricht man von „reaktivem Sputtern“. Anlegen eines Magnetfeldes zwecks Ausnutzung des Penning-Prinzips führt zum sogenannten „Magentron“-Sputtern. Diese Methode erlaubt besonders hohe Aufstäubraten und wurde zur Herstellung der TCO-Schichten genutzt.

¹oder „Sputtern“ vom englischen Begriff „Sputtering“

²engl.: (P)hysical (V)apour (D)eposition

³engl.: Target

⁴engl.: Substrat

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen zur Charakterisierung von dünnen TCO-Schichten

Zur Charakterisierung der TCO-Schichten wurde deren optische Transmission, der Schichtwiderstand und die Dicke bestimmt. Diese drei Messungen fließen in die so genannte „figure of merit“ ein (siehe Abs. 5.3). Die Transmissionsmessungen wurde spektral durchgeführt.

Es mußte eine geeignete Methode gefunden werden um eine repräsentative Aussage über die Transparenz der Schicht im Hinblick auf die Anwendung „Solarzelle“ machen zu können. Als sinnvoll zeigte sich eine Mittelung der Transmissionswerte, da aufgrund von Interferenzerscheinungen die Transmission spektral auch stark von der Schichtdicke abhängt. Als Intervall wird - mit Hinblick auf die Anwendung Solarzelle - der Bereich von 400nm bis 800nm gewählt.

3.1 Spektralabhängige Messung der optischen Transmission

Bei der Bestrahlung einer Schicht mit Licht wird ein gewisser Anteil des eingestrahnten Lichtes an der vorderen Grenzschicht reflektiert - der Rest wird in die Schicht hinein transmittiert. Dieser Anteil wiederum wird nun teilweise an der hinteren Grenzschicht transmittiert bzw. reflektiert. Dadurch das an der hinteren und vorderen Grenzschicht Licht reflektiert wird erfolgt eine Überlagerung zwischen den Lichtwellen die innerhalb der Schicht sozusagen „hin und her“ laufen. Durch diese Überlagerung ergeben sich Interferenzerscheinungen, welche sich in einem spektralabhängigen Transmissionsverhalten niederschlagen. Die Fresnelgleichungen beschreiben diesen Vorgang und damit auch die resultierende Gesamttransmission von Licht durch die dünnen Schichten hindurch in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Im folgenden soll davon ausgegangen werden, daß keine Absorption innerhalb der Schicht erfolgt und der Lichteinfall senkrecht zur Schichtebene ist. Damit ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\text{Reflexionskoeffizient : } r = \frac{r_1 + r_2 e^{-i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-i\delta}} \quad (3.1.1)$$

$$\text{Transmissionskoeffizient : } t = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-i\delta}} \quad (3.1.2)$$

Mit δ als Gangunterschied und r_1, r_2, t_1 und t_2 als den Fresnel-Koeffizienten.

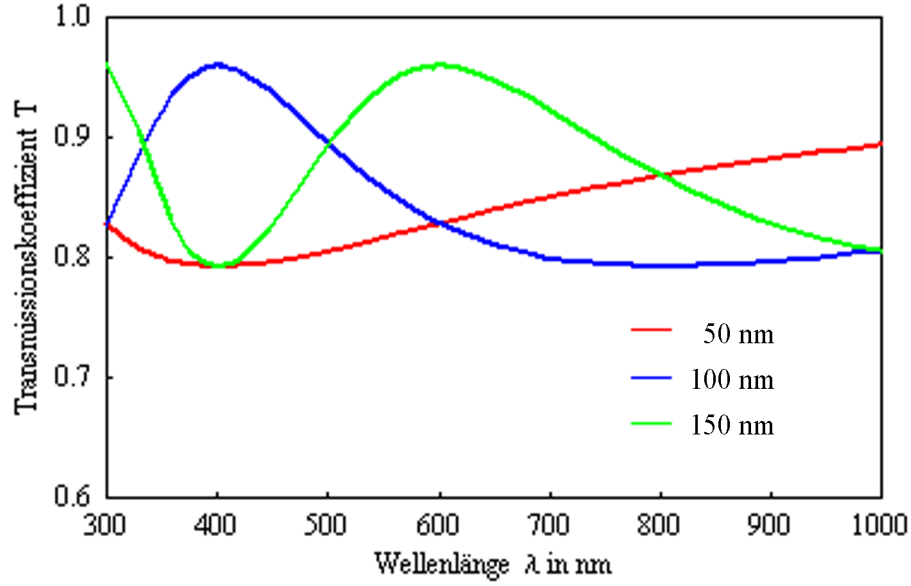


Abbildung 3.1: Transmission für verschiedene Schichtdicken in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Angenommene Brechungsinduxe: $n_0 = 1$, $n_1 = 2$ und $n_2 = 1,5$)

Die Fresnel-Koeffizienten sind gegeben durch:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} & r_2 &= \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \\ t_1 &= \frac{2n_0}{n_0 + n_1} & t_2 &= \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

wobei n_0 den Brechungsindex vor der Schicht, n_1 den in der Schicht und n_2 den hinter der Schicht bezeichnet

Damit ergibt sich für durch Quadrierung von r und t die Anteile für das reflektierte bzw. transmittierte Licht.

$$R = r^*r = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos\delta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2\cos2\delta} \quad (3.1.4)$$

$$T = t^*t = \frac{n_2}{n_0} \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\delta} \quad (3.1.5)$$

Für den Gangunterschied der Transmission folgt:

$$\delta_t = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d \quad (3.1.6)$$

In Abb. 3.1 ist die Transmission nach Gl. 3.1.5 für 3 verschiedene Schichtdicken aufgetragen. Zu erkennen ist das für größer werdende Schichtdicken die Abstände zwischen den einzelnen Maxima und Minima kleiner werden.

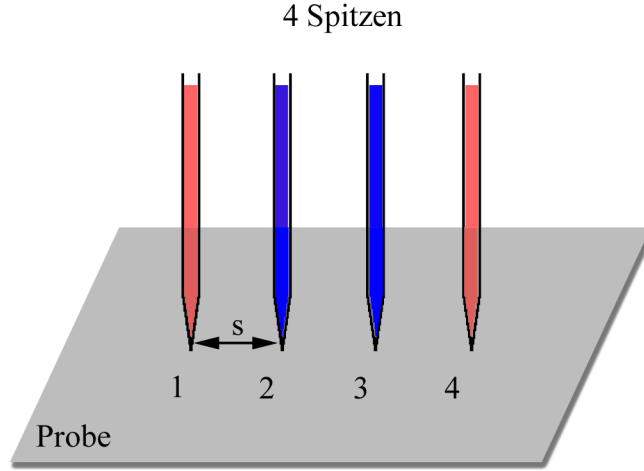


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Vier-Spitzenmessung

3.2 Messung des Schichtwiderstandes mittels Vierspitzenmethode

Der elektrische Widerstand R ist definiert als der Quotient aus dem Potentialunterschied $\Delta\phi$ und dem Stromfluss I :

$$R = \frac{\Delta\phi}{I} \quad \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (3.2.1)$$

Allgemein ist das Potential ϕ_2 in einem Punkt r_2 , von einer den Strom I führenden Elektrode am Punkt r_1 bei halbumendlicher Geometrie gegeben durch:

$$\phi_2 = \frac{\rho I}{2\pi \|r_2 - r_1\|} \quad (3.2.2)$$

Hierbei ist ρ der spezifische Widerstand des Materiales.

Gegeben war eine regelmäßige lineare Anordnung von 4 Spitzen mit dem gleichen Abstand s zwischen den einzelnen Spitzen (Abb. 3.2). An die äußeren Spitzen (rot) wird eine Spannung U angelegt, so daß durch das Substrat ein Strom I fließt. Für das Potential an der zweiten und dritten Spitze (blau) ergibt sich:

$$\phi_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s+s} \right] = \frac{\rho I}{4\pi s} \quad (3.2.3)$$

$$\phi_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{s+s} - \frac{1}{s} \right] = -\frac{\rho I}{4\pi s} \quad (3.2.4)$$

Damit ergibt sich für ρ bei einer Potentialdifferenz $\Delta\phi$ von:

$$\rho = \frac{\Delta\phi 2\pi s}{I} \quad (3.2.5)$$

Abweichungen von der halbumendlichen Geometrie werden durch einen Korrekturfaktor F berücksichtigt:

$$\rho = F \frac{\Delta\phi 2\pi s}{I} \quad (3.2.6)$$

Einfluss auf diesen Faktor F haben die Probendicke d (Faktor F_1), die Platzierung der Spitzen rel. zur Probe (Faktor F_2) und die laterale Probengeometrie (Faktor F_3):

$$F = F_1 F_3 \ln(2) \frac{F_2}{\pi} \quad (3.2.7)$$

Unter der Voraussetzung, daß die Spitzen in der „Mitte“ der Probe platziert werden kann der Faktor F_2 näherungsweise gleich eins gesetzt werden. Desweiteren soll die laterale Probengeometrie (Dicke der Schicht) als konstant angenommen werden, daher wird F_3 eins gesetzt. Für den Korrekturfaktor F_1 gilt für sehr dünne Schichten ($d \ll s$):

$$F_1 = \frac{d}{2 \ln(2) s} \quad (3.2.8)$$

Somit folgt für den Schichtwiderstand unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors F_1 :

$$\rho_s = \frac{\rho}{d} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{\Delta\phi}{I} \quad (3.2.9)$$

Kapitel 4

Versuchsdurchführung

Nachfolgend soll kurz auf die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der Präparation und der Charakterisierung der TCO-Schichten eingegangen werden.

4.1 Präparation der TCO-Schichten

4.2 Transmissionsmessung

Bei der Transmissionsmessung wird eine Referenzmessung zu einem „Klarglas“ durchgeführt. Im folgende eine kurze Skizze des Versuchsablaufes:

- Spektrometer anschalten (genutzt wird Gitter 2 mit 300 Strichen)
- Graufilter 4 und Blaufilter BG 14 in Strahlengang bringen
- Lampe anschalten
- Programm starten (c:/messungen/oriel/instaspec/IS4E1024.EXE) und Helligkeit der Lampe so einregeln das kein „clipping“ vorkommt und warten bis die Thermometeranzeige gelb wird
- Programm beenden
- batchdatei plaenitz.bat starten (selber Pfad)
- zunächst wird der Hintergrund bestimmt als nächstes eine Referenzmessung für die man ein unbeschichtetes Substrat einlegen muß, danach folgt erst die eigentliche Messung mit der Probe
- Für jede Probe wird dieses Spiel mehrmals durchlaufen, da das Spektrometer nur einen Wellenlängenbereich von 300 nm auf einmal abdecken kann
- Gespeichert werden die Daten unter c:/myfiles/transmis/messungen/ - Es erfolgt eine Speicherung der Spektren der Referenzmessung (Probennummer.ref), der eigentlichen Messung (Probennummer.dat) sowie eine Ergebnisdatei (Probennummer-tra.dat). Alle Dateien liegen im ASCII-Format vor.

4.3 Leitfähigkeitsmessung

Die Leitfähigkeitsmessung erfolgt mittels der Vier-Spitzen-Methode. Es ist darauf zu achten, die Spitzen möglichst zentral auf die Probe zu setzen und den Strom angemessen zu wählen¹. Die Daten müssen

¹Für zu geringe Ströme ist die Spannungsmessung verauscht - für zu große Ströme folgt eine Erwärmung der Probe

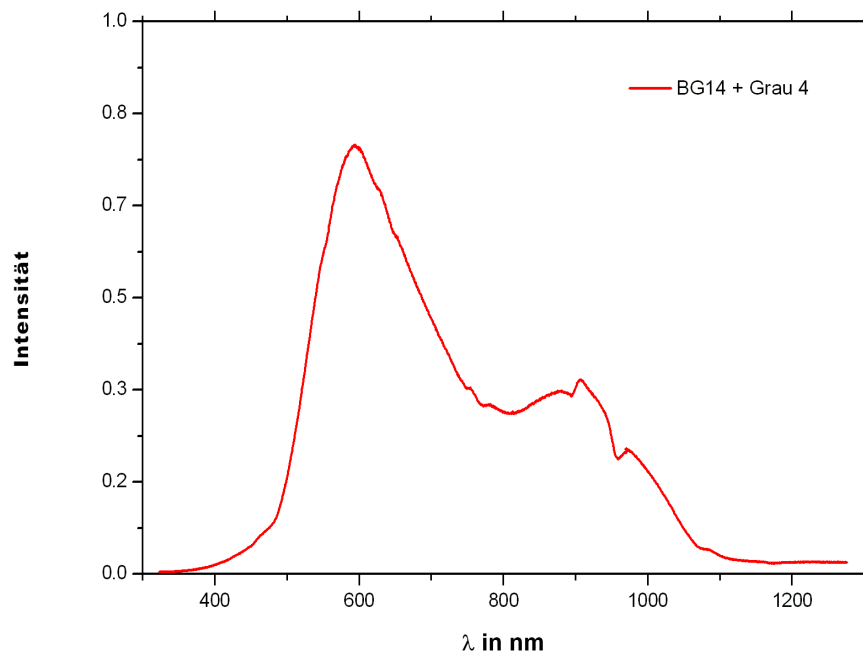


Abbildung 4.1: Referenztransmission der verwendeten Filterkombination

notiert werden und später mittels eines kleinen Programmes in den Rechner eingegeben werden (siehe Abs. 4.5).

4.4 Schichtdickenbestimmung

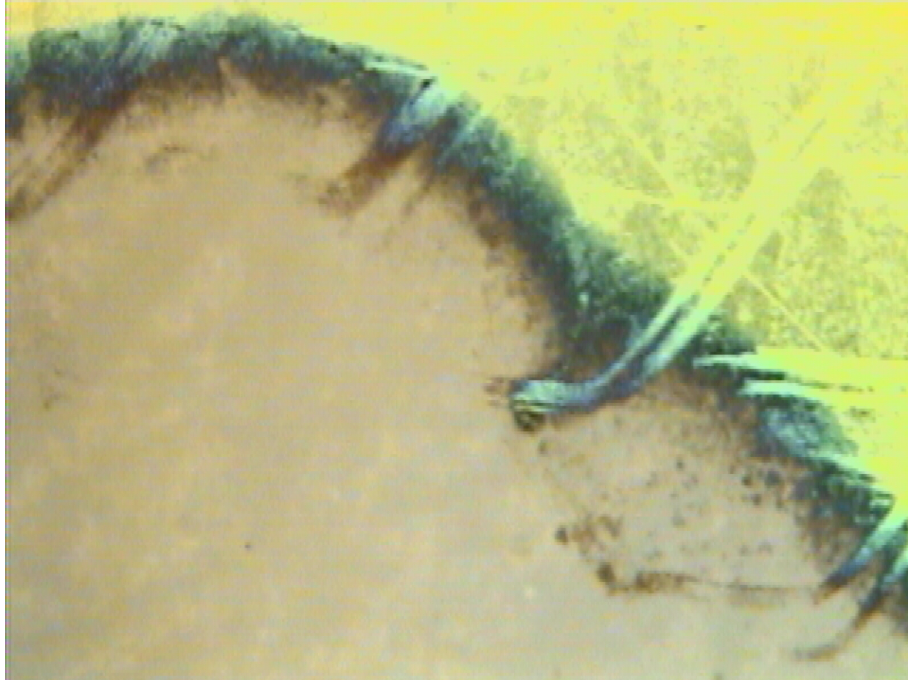


Abbildung 4.2: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Ätzkante

Die Messung der Schichtdicke erfolgt mittels eines Profilometers. Zur Erzeugung der Stufe wird naßchemische geätzt. (ein Tropfen 10% HCl ca. 5 sek). Danach wird am Lichtmikroskop kontrolliert ob die Ätzkante hinreichend abrupt für die Profilometermessung ist.

4.5 Zusammenführung der Daten in einer zentralen Datei

Nach der Charakterisierung der Schichten ist es notwendig die erhaltenen Daten in geeigneter Art und Weise zusammenzustellen. Wichtig ist dabei die Übersichtlichkeit, einfache Handhabung auch bei großen Datenmengen und Flexibilität gegenüber späteren Erweiterungen.

Zu diesem Zweck wurde ein kleines C++ Programm geschrieben, welches die verschiedenen Datenfiles ausliest und aufbereitet (D:/plaenitz_philipp/Cpp/daten.exe).

Kapitel 5

Versuchsplanung

Innerhalb eines Optimierungsprozesses ist es nötig den Einfluss einer Reihe von Faktoren auf die zu optimierenden Größen zu bestimmen. Je größer die Anzahl von Faktoren wird desto sinnvoller wird der Einsatz von mathematischen Methoden der statistischen Versuchsplanung.

Im folgenden möchte ich zunächst auf die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung eingehen. Dann anschließend auf den Versuchsplan.

5.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Meßergebniss als Zufallsgröße X mit dem Erwartungswert μ und der Varianz σ^2 :

$$X = \mu + \epsilon \quad (5.1.1)$$

$$EX = \mu \quad (5.1.2)$$

$$D^2\epsilon = \sigma^2 \quad (5.1.3)$$

Für den Fall das die Meßgröße Y von mehreren Faktoren (A,B,C,...) abhängig ist ergibt sich, jedoch keine Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren bestehen, ergibt sich:

$$Y(A, B, C, \dots) = f(A, B, C, \dots) + \epsilon \quad (5.1.4)$$

Zur Bestimmung des notwendigen Stichprobenumfanges n^* gelten folgende Formeln:

$$P(|\bar{X}_n - \mu| \leq d) = 1 - \alpha \quad (5.1.5)$$

$$n^* = u_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \frac{\sigma^2}{d^2} \quad (5.1.6)$$

α : erlaubte Abweichung

$u_{1-\frac{\alpha}{2}}$: das $(1 - \frac{\alpha}{2})$ -Quantil der standardisierten Normalverteilung

5.2 D-optimaler Versuchsplan

Zur Schaffung eines Optimierungskriteriums wird eine Informationsmatrix $\mathbf{M}(V_n)$ eingeführt. Günstig ist es nun ein Funktional der Informationsmatrix zu definieren. Dabei handelt es sich um eine Abbildung von $\mathbf{M}(V_n)$ in den Raum der reellen Zahlen \mathbb{R}^1 .

Als Kriterium für einen „D-optimalen“ Versuchsplan V_n^* gilt:

$$\det M^{-1}(V_n^*) = \min \det M^{-1}(V_n) \quad (5.2.1)$$

Daraus ergibt sich auch die Namensgebung des „D-optimalen“ Versuchsplanung, da das Optimierungskriterium die Minimierung der Informationsmatrix-Determinante ist.

Vorteile der D-optimalen Versuchspläne:

- Freie Wahl für die Zahl der Stufen pro Einflussfaktor. Die Stufenzahl kann von Faktor zu Faktor unterschiedlich gewählt werden.
- Freie Wahl der Stufenabstände, die äquidistant oder nicht äquidistant gewählt werden können.
- Freie Wahl für die Verteilung der Versuchspunkte im n-dimensionalen Versuchsraum.
- Freie Wahl des mathematischen Modells
- Erweiterungsmöglichkeit durch neue Einflussfaktoren
- Bestimmte Einstellungen und Kombinationen können ausgeschlossen werden, die nicht erreichbar sind

Nachteile der D-optimalen Versuchspläne:

- Der Versuchsplan ist nicht orthogonal, die Abweichungen sind aber meist nur klein.
- Vorher nicht festgelegte Wechselwirkungen sind später nicht mehr schätzbar.
- Evtl. zu wenig Versuchspunkte in der Mitte des Versuchsraumes, dadurch in diesem Bereich keine Aussage
- Die Erstellung der Pläne ist nur mit entsprechenden Rechenalgorithmen möglich

5.3 „figure of merit“

Die Optimierung der Schichteigenschaften bedeutet sowohl eine Maximierung der Transmission als auch der Leitfähigkeit. Zur Schaffung eines Optimierungsparameters wird eine Möglichkeit gesucht die Eigenschaften der Schichten (Transmission T und Schichtwiderstand R_s) in geeigneter Weise zu verknüpfen.

Der sich ergebende optimierungsparameter wird als „figure of merit“¹ bezeichnet. Es gibt verschiedene Varianten die einzelnen Schichtparameter mit einander zu verbinden, je nach ihrer Wichtung (siehe Gl. 5.3.1 und 5.3.2).

$$F_{TC} = \frac{T}{R_s} = \frac{d}{\rho} e^{-\alpha d} \quad (5.3.1)$$

$$\phi_{TC} = \frac{T^{10}}{R_s} = \frac{d}{\rho} e^{-10\alpha d} \quad (5.3.2)$$

Der Schichtwiderstand und die Transmission sind dabei gegeben durch:

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha d} \quad (5.3.3)$$

ρ : spez. Widerstand, d : Schichtdicke, α : Absorptionskoeffizient

In der vorliegenden Arbeit wurde die Funktion ϕ_{TC} verwendet, da sich bei ihr das Maximum bei einer Schichtdicke einstellt die einer Transmission von ca. 91 Prozent entspricht.

$$\frac{\partial F_{TC}}{\partial d} = 0 \Rightarrow d_{max} = \frac{1}{\alpha} \Rightarrow T(d_{max}) \approx 37 \text{ Prozent} \quad (5.3.4)$$

$$\frac{\partial \phi_{TC}}{\partial d} = 0 \Rightarrow d_{max} = \frac{1}{10\alpha} \Rightarrow T(d_{max}) \approx 90.5 \text{ Prozent} \quad (5.3.5)$$

¹Vorgeschlagen von G. Haacke [Haacke 76]

Kapitel 6

Ergebnisse

Die Tabelle 6.1 zeigt für 3 ausgewählte Probenserien die Sputterparameter, die Ergebnisse der Messungen und die „figure of merit“ - in Abb. 6.1 sind diese Probe in ein Diagramm (Transmission über Schichtwiderstand) eingezeichnet.

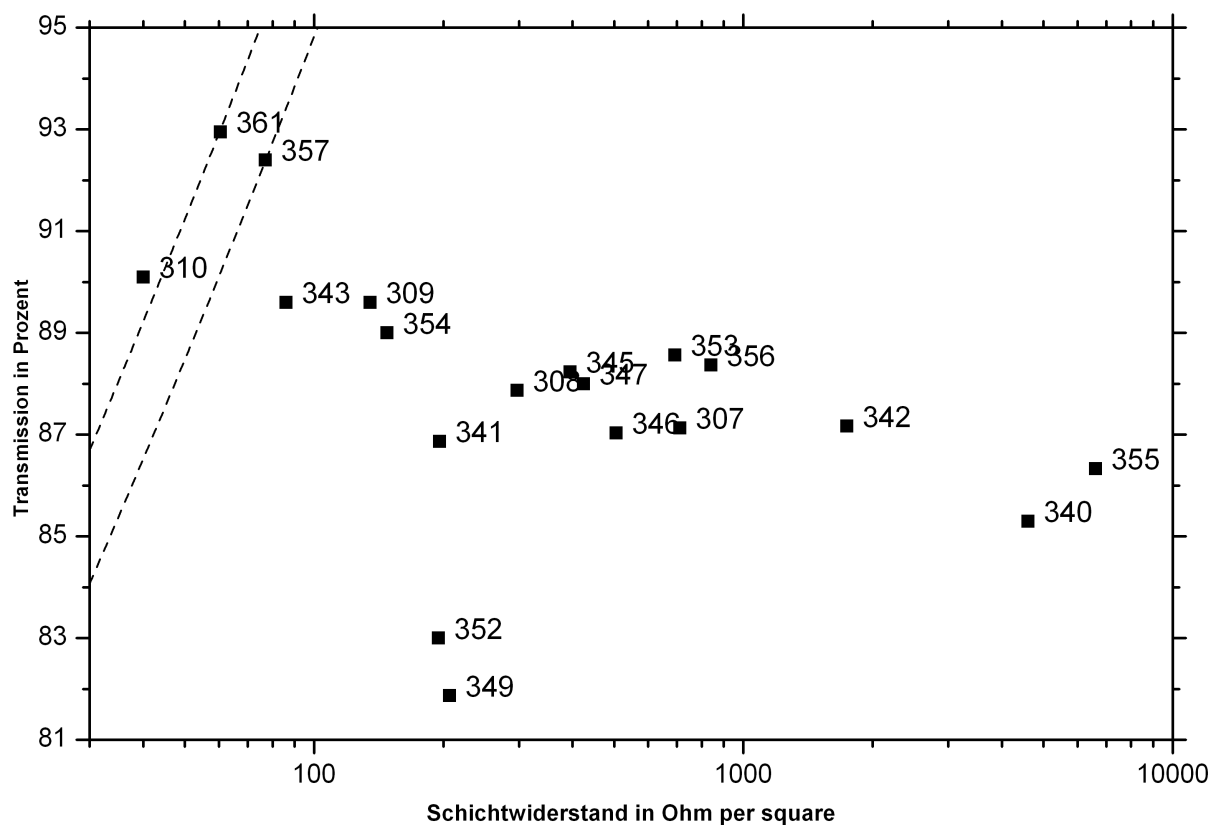


Abbildung 6.1: Einordnung der Proben hinsichtlich ihrer Transmission und Leitfähigkeit. Die beiden gestrichelten Geraden bezeichnen Linien entlang deren die „figure of merit“ konstant ist

Zu erkennen ist aus der dritten Serie das für Leistungen P_{Al} größer als 140 Watt und gleichzeitig Sauerstofffluss ϑ_{O_2} unter 22 sccm die Schichten hochhomig sind.

Hauptsächlich wird die Schichtdicke durch die Kombination der Parameter: Leistung des Zink und Sauerstofffluss beeinflusst.

Proben- nummer	P _{Al}	P _{Zn}	ϑ_{O_2}	Transmission	Schicht- widerstand	Schicht- dicke	figure of merit
306	60	130	24	84,1	1908	186	9,3E-05
307	80	130	24	87,1	712	198	3,5E-04
308	100	130	24	87,9	297	208	9,2E-04
309	120	130	24	89,6	135	202	2,5E-03
310	140	130	24	90,1	40	224	8,8E-03
340	115	135	28	85,3	4602		4,4E-05
341	80	120	20	86,9	196	77	1,3E-03
342	150	120	28	87,2	1742		1,5E-04
343	115	135	20	89,6	86	100	3,9E-03
344	150	150	20	97,5	hochohmig		
345	115	120	24	88,2	395		7,2E-04
346	150	150	28	87,0	505		4,9E-04
347	150	150	28	88,0	424		6,6E-04
348	80	150	28	84,5	6000000		3,1E-08
349	80	150	20	81,9	207		6,5E-04
350	80	120	28	84,6	10000000		1,9E-08
351	150	120	20	98,2	20000000		4,2E-08
352	80	150	20	83,0	195		8,0E-04
353	150	150	28	88,6	692		4,3E-04
354	115	150	24	89,0	148	104	2,1E-03
355	80	135	24	86,3	6609		3,5E-05
356	150	150	28	88,4	841		3,5E-04
357	150	135	24	92,4	77	86	5,9E-03
358	150	135	20	96,3	hochohmig		
359	170	135	20	98,5	hochohmig		
360	130	135	16	99,3	hochohmig		
361	130	135	22	93,0	61	52 ?	8,0E-03
362	130	135	20	98,7	hochohmig		
363	170	135	22	98,5	hochohmig		
364	140	135	22	93,0	61	113	7,9E-03
365	160	135	16	97,2	hochohmig		
366	130	135	18	98,4	hochohmig		
367	170	135	16	91,1	hochohmig		
368	140	135	16	91,6	hochohmig		
369	170	135	22	98,1	hochohmig		
370	170	135	18	98,0	hochohmig		
371	160	135	22	98,2	hochohmig		

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Sputterparameter, Messungen und „figure of merit“ für 3 Probenserien

Kapitel 7

Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuche mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung lieferten nicht den erwünschten Erfolg einer direkten Optimierung der Schichteigenschaften Transmission und Leitfähigkeit durch Optimierung der Depositionsparameter P_{Zn}, P_{Al} und θ_{O_2} . Als Ursache dafür werden unzureichend bekannte Abhängigkeiten gesehen, die in Vorversuchen zunächst bestimmt werden müssen. Es handelt sich dabei um den komplizierten Einfluß von Sauerstoffpartialdruck, Substrattemperatur und Depositionsrates auf die Schichteigenschaften.

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, daß im untersuchten Parameterbereich von P_{Zn} und $T_S = 150^\circ C$ mit abnehmender O_2 -Einlaßrate die Wachstumsrate stark abnimmt. Verantwortlich hierfür ist der relativ hohe Dampfdruck von Zn.

Als nächstes muß eine nähere Untersuchung der Randbedingungen erfolgen:

- Einfluss des Sauerstoffpartialdruckes auf die Abscheiderate
- Einfluss der Substrattemperatur auf die Abscheiderate und die chem. Zusammensetzung der Schicht ($R_{Al}(\vartheta_{O_2}), R_{Zn}(\vartheta_{O_2})$)
- Untersuchung des thermischen Gleichgewichts an der Oberfläche des Substrates ($R_{Al}(T), R_{Zn}(Z), Zn_xO_y, Al_xO_y$)

Danach ist erst eine geeignete Modellierung möglich um der statistische Versuchsplanung eine sinnvolle Basis zu geben.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Transmission für verschiedene Schichtdicken in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Angenommene Brechungsindexe: $n_0 = 1$, $n_1 = 2$ und $n_2 = 1,5$)	10
3.2	Schematische Darstellung der Vier-Spitzenmessung	11
4.1	Referenztransmission der verwendeten Filterkombination	14
4.2	Lichtmikroskopische Aufnahme einer Ätzkante	15
6.1	Einordnung der Proben hinsichtlich ihrer Transmission und Leitfähigkeit. Die beiden gestrichelten Geraden bezeichnen Linien entlang deren die „figure of merit“ konstant ist	19

Literaturverzeichnis

- [Bandemer, Bellmann 94] H. Bandemer, A. Bellmann, Statistische Versuchsplanung, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig (1994)
- [Haacke 76] G. Haacke, New figure of merit for transparent conductors, Journal of Applied Physics, Vol 47, No.9, September 1976, 4086-4089
- [Weißmantel 95] Ch. Weißmantel, C. Hamann, Grundlagen der Festkörperphysik, Johann Ambrosius Barth (1995), 432-500