

Fachpraktikum

Mikroelektronik und Sensorik

Versuch: Schichtdickenbestimmung mittels Ellipsometrie



Versuchsanleitung Schichtdickenbestimmung mittels Ellipsometrie: Grundlagen

1. Einführung

In der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik ist einer der wichtigsten Prozeßschritte, die Herstellung dünner und dünnster Schichten. Sie bestimmen wesentlich die Funktionsparameter der Bauelemente. Zum Erreichen der geforderten Parameter ist eine definierte und reproduzierbare Prozeßführung notwendig, die auf der Messung und Untersuchung der hergestellten Schichten, sowohl während als auch nach dem Prozeß, basiert.

Ein Standardverfahren zur Bestimmung der Schichtdicke dünner transparenter und semitransparenter Schichten ist die Ellipsometrie. Sie beruht auf dem physikalischen Effekt, daß eine polarisierte Lichtwelle bei der Reflexion an einer Oberfläche ihren Polarisationszustand ändert. Dieser ist abhängig von deren optischen Eigenschaften. Meßgeräte, die diesen Effekt für die Untersuchung von dünnen Schichten ausnutzen werden als Ellipsometer bezeichnet. Der Vorzug dieser Meßmethode besteht im gleichzeitigen quantitativen Bestimmen zweier Meßwerte, Brechzahl und Schichtdicke, und im Messen extrem dünner Schichten. Auch Brechzahlmessungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge sind zur Schichtcharakterisierung möglich. Die physikalischen Grundlagen dieses Verfahrens und der apparative Aufbau solcher Meßgeräte werden in dieser Anleitung beschrieben.

Neuartige rechnergesteuerte Ellipsometer erlauben die Bestimmung von Brechzahl und Schichtdicke in einer Zeit < 0.1 s. Die Schichtdicke kann auf ± 0.03 nm genau gemessen werden. Das Ellipsometer wird auch für *in situ* Messungen eingesetzt, wie z. B. der Schichtabscheidung und dem Trockenätzen. Die Genauigkeit dieses Meßverfahrens hängt maßgeblich von den folgenden Faktoren ab:

- (1) Die Beschaffenheit der Oberfläche, insbesondere die Rauheit, bildet eine natürliche Meßgrenze. Inhomogenitäten können mit kleine Meßfleckdurchmessern gut erkannt werden. Er liegt im Bereich von einigen mm^2 und kann durch Abdecken unerwünschter Oberflächenteile oder durch Ausblendung und Vergrößerung interessierender Bereiche auf einige $100\mu\text{m}^2$ reduziert werden.
- (2) Die Änderungen der Phasenverschiebung Δ und des Amplitudenverhältnisses Ψ hängen vom Einfallswinkel ab. Besonders günstig bezüglich der Empfindlichkeit der Ellipsometrie sind Einfallswinkel in der Nähe des Brewster-Winkels.
- (3) Die Bestimmung von Brechzahl und Schichtdicke wird um so ungenauer, je näher man an die Periodengrenze kommt, da dort die Kurven für verschiedene Brechzahlen zusammenlaufen.

- (4) Die Meßgenauigkeit hängt von der Güte der Meßapparatur ab. Wichtige Einflußgrößen sind die Monochromasie und Parallelität des Lichtes, die Qualität von Kompensator, Polarisator und Analysator, die Präzision der Teilkreise und die Einstellgenauigkeit des Reflexionswinkels.

Die Ellipsometrie ist ebenfalls geeignet, Substrate mit mehreren transparenten Schichten zu untersuchen. Es ist prinzipiell möglich auch vergrabene Schichten zu messen.

2. Versuchsgrundlagen

Wird eine Lichtwelle an der Grenzfläche zweier Medien reflektiert, so ändert sich ihr Polarisationszustand in Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften beider Materialien. Er wird durch die Fresnelschen Formeln beschrieben.

2.1. Die Fresnelschen Formeln

Betrachten wir einen auf eine Oberfläche auftreffenden Lichtstrahl, so wird ein Anteil reflektiert und einer transmittiert (**Abb.1**). Einfallender, reflektierter und transmittierter Strahl liegen in einer Ebene, in der ebenfalls die Normale der Reflexionsfläche liegt. Für die Strahlungsleistung der einzelnen Strahlen gilt

$$\Phi_e = \Phi_r + \Phi_t \quad (1)$$

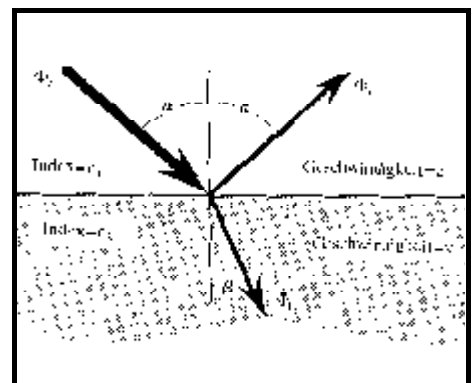


Abb. 1 Reflexion und Brechung eines Lichtstrahles an einer Oberfläche.

Bei Einführung der Leistungsdichte (Energiefluß pro Fläche) erhält man unter Benutzung des Einfallswinkels a , des Brechungswinkels b und der bestrahlten Fläche A

$$S_e A \cos(a) = S_r A \cos(a) + S_t A \cos(b) \quad (2)$$

Die Leistungsdichte einer elektromagnetischen Welle kann durch deren elektrische Feldstärke beschrieben werden

$$\sqrt{\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{m}_0}} E^2_e = \sqrt{\frac{\mathbf{e}_1}{\mathbf{m}_0}} E^2_r + \sqrt{\frac{\mathbf{e}_2}{\mathbf{m}_0} \frac{\cos(\mathbf{b})}{\cos(\mathbf{a})}} \quad (3)$$

Mittels der Maxwellschen Beziehung

$$\sqrt{\frac{\mathbf{e}_2 \mathbf{m}_0}{\mathbf{e}_1 \mathbf{m}_0}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

sie gibt den Zusammenhang der Dielektrizitätskonstanten ϵ und der magnetischen Permeabilität μ mit dem Brechungsindex n an, vereinfacht sich (3) zu

$$E^2_e - E^2_r = \frac{n_2}{n_1} f_a E^2_t \quad (5)$$

Dabei wurde eine Abkürzung für die Bündelquerschnitte verwendet

$$f_a = \frac{\cos(\mathbf{b})}{\cos(\mathbf{a})} = \sqrt{1 + \tan^2(\mathbf{a}) \left(1 - \frac{n_1^2}{n_2^2}\right)} \quad (6)$$

unter Benutzung des Snelliusschen Brechungsgesetzes. In Bezug auf die Einfallsebene des Lichtstrahles kann die elektrische Feldstärke, sie steht stets senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, in die beiden Komponenten parallel (2) und senkrecht (Z) zur Ebene zerlegt werden (**Abb.2**).

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Betrachten wir zunächst die senkrechten Komponenten der Feldstärke an der Oberfläche des reflektierenden Mediums. Sie liegen dort stets tangential zu dieser. Auf Grund der Stetigkeit der elektrischen Feldstärke in tangentialer Richtung an der Grenzfläche zweier Medien gilt

$$E_{ez} = E_{rz} + E_{tz} \quad (8)$$

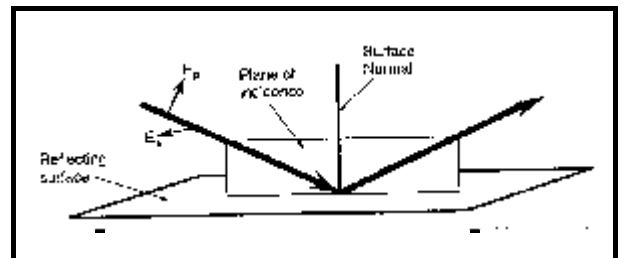


Abb.2 Zerlegung des elektrischen Feldes in die beiden Komponenten, parallel und senkrecht zur Einstrahlungsebene

Gemäß (5) gilt außerdem für die senkrechte Komponente

$$E_{e\perp} - E_{r\perp} = \frac{n_2}{n_1} f_a E_{t\perp} \quad (9)$$

Durch Elimination von $E_{t\perp}$ aus (8) und (9) erhält man das Verhältnis der senkrechten Komponente der elektrischen Feldstärke der reflektierten elektromagnetischen Welle zur einfallenden.

$$q_{r\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{e\perp}} = - \frac{\frac{n_2}{n_1} f_a - 1}{\frac{n_2}{n_1} f_a + 1} = - \frac{\sin(\mathbf{a} - \mathbf{b})}{\sin(\mathbf{a} + \mathbf{b})} \quad (10)$$

In analoger Weise läßt sich dies für das Verhältnis des transmittierten Strahles zum einfallenden aufstellen

$$q_{t\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{e\perp}} = \frac{2}{\frac{n_2}{n_1} f_a + 1} = \frac{2 \cos(\mathbf{a}) \sin(\mathbf{b})}{\sin(\mathbf{a} + \mathbf{b})} \quad (11)$$

Zur Betrachtung der Parallelkomponente des elektrischen Feldes ist es vorteilhaft, diese durch die senkrechte Komponente der magnetischen Feldstärke H_z auszudrücken, da selbige tangential zur Grenzfläche beider Medien verläuft. Unter Benutzung der Substitution $E_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} H_z$ und des Durchflutungsgesetzes erhält man die folgende

Beziehung für die Parallelkomponente des elektrischen Feldes

$$E_{e\parallel} - E_{r\parallel} = f_a E_{t\parallel} \quad (12)$$

Aus (12) und (5) folgt

Das Verhältnis der elektrischen Feldstärken des reflektierten Strahles zum Einfallenden ermittelt sich aus den beiden

$$E_{e\parallel} - E_{r\parallel} = \frac{n_2}{n_1} E_{t\parallel} \quad (13)$$

letzten Beziehungen zu

$$q_{t\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{e\perp}} = \frac{\frac{n_2}{n_1} - f}{\frac{n_2}{n_1} f_a + 1} = \frac{\tan(\mathbf{a} - \mathbf{b})}{\tan(\mathbf{a} + \mathbf{b})} \quad (14)$$

$$q_{t\perp} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{e\perp}} = \frac{2}{\frac{n_2}{n_1} f_a} = \frac{2 \cos(\mathbf{a}) \sin(\mathbf{b})}{\sin(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \cos(\mathbf{a} - \mathbf{b})} \quad (15)$$

Analog zum reflektiven Anteil bekommt man den transmittierenden Anteil.

Die vier Gleichungen (10), (11), (12) und (13) werden als Fresnelsche Formeln bezeichnet. Sie beschreiben die Reflexion, die Brechung und die Polarisation des Lichtes (elektromagnetischer Wellen) an Grenzflächen isotroper Medien. Mittels dieser vier Größen $q_{r\perp}$, $q_{r\parallel}$, $q_{t\perp}$ und $q_{t\parallel}$ erhält man für den Transmissionsgrad

$$t = \frac{n_2}{n_1} \frac{q_{t\perp}^2 E_{e\perp}^2 + q_{t\parallel}^2 E_{e\parallel}^2}{E_{e\perp}^2 + E_{e\parallel}^2} \quad (16)$$

bzw. für den Reflexionsgrad

$$r = \frac{q_{r\perp}^2 E_{e\perp}^2 + q_{r\parallel}^2 E_{e\parallel}^2}{E_{e\perp}^2 + E_{e\parallel}^2} \quad (17)$$

In **Abb.3** (A) ist das Verhältnis der zur Einfallsebene parallelen und senkrechten Komponenten der elektrischen Feldstärke der reflektierten elektromagnetischen Welle zur auftretenden Welle in Abhängigkeit vom Einfallswinkel \mathbf{a} dargestellt. Dies sind die Fresnelkoeffizienten, beschrieben durch die Gleichungen (10) und (14). Im Bildteil (B) ist der "Reflexionsgrad" für beide Anteile, $r_{\parallel} = |q_{r\parallel}|^2$ bzw. $r_{\perp} = |q_{r\perp}|^2$, als Funktion vom Einstrahlungswinkel gezeigt. Er beschreibt das Intensitätsverhältnis des reflektierten zum einfallenden Licht. Zusätzlich ist der Polarisationswinkel eingezeichnet, bei dem die reflektierte elektromagnetische Welle nur noch einen zur Einfallsebene senkrecht polarisierten Anteil enthält. Reflexionen unter dem genannten Winkel können genutzt werden, um aus unpolarisiertem Licht linearpolarisiertes zu erhalten.

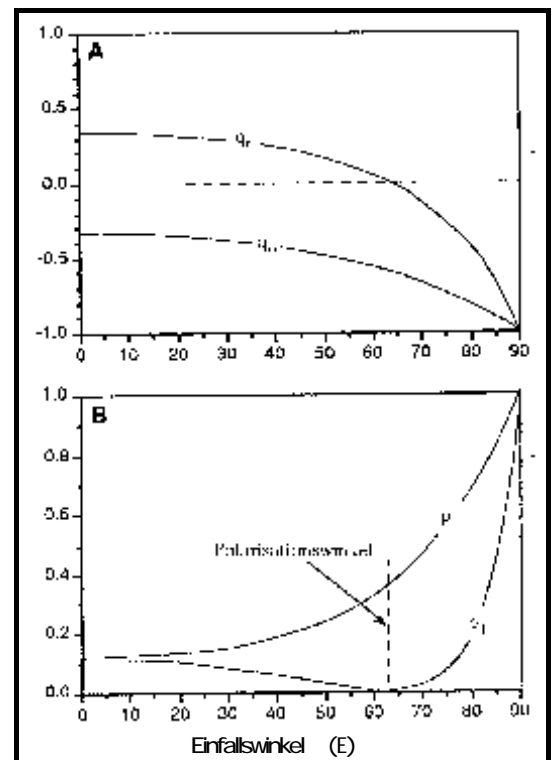


Abb.3 (A) Verhältnis der Amplituden des E-Feldes der reflektierten Welle zur einfallenden (Fresnel-Koeffizienten). (B) Reflexionsgrad.

2.2. Die azimutalen Winkel

Der Azimutwinkel des einfallenden Lichtstrahles (Einfallazimut) charakterisiert das Verhältnis der maximalen Komponenten des Vektors des elektrischen Feldes E_{ez} und E_{e2}

$$\tan(\Psi_e) = \frac{|E_{e\parallel}|}{|E_{e\perp}|} \left\{ \text{bzw. } \tan(\mathbf{j}_e) = \frac{|E_{e\perp}|}{|E_{e\parallel}|} \right\} \quad (18)$$

Infolge der Reflexion verändern sich die Anteile E_z und E_2 im reflektierten Strahl im Vergleich zum einfallenden. Bei Mehrfachreflexionen (Sie treten in transparenten und semitransparenten Schichten auf.) sowie bei Reflexionen an absorbierenden Medien tritt zusätzlich eine Phasenverschiebung auf. Die Maximalwerte der E-Feldkomponenten parallel und senkrecht zur Einfallsebene des reflektierten Lichtstrahles bestimmen den Ausfallazimut

$$\tan(\Psi_r) = \frac{|E_{r\parallel}|}{|E_{r\perp}|} \left\{ \text{bzw. } \tan(\mathbf{j}_r) = \frac{|E_{r\perp}|}{|E_{r\parallel}|} \right\} \quad (19)$$

Die möglicherweise auftretende Phasenverschiebung zwischen E_{r2} und E_{rz} kann folgendermaßen eingeführt werden

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{r\perp}} = \frac{|E_{r\parallel}| e^{i d_{\parallel}}}{|E_{r\perp}| e^{i d_{\perp}}} = \frac{|E_{r\parallel}|}{|E_{r\perp}|} e^{i(d_{\parallel} - d_{\perp})} = \frac{|E_{r\parallel}|}{|E_{r\perp}|} e^{i \Delta} \quad (20)$$

Dabei wurde die komplexe Schreibweise zur Charakterisierung der Phasenlage der Komponenten des elektrischen Feldes genutzt. Δ bezeichnet den Phasenunterschied zwischen der parallelen und senkrechten Komponente des elektrischen Feldes für den reflektierten Strahl. Benutzt man linear polarisiertes Licht zur Bestrahlung einer Probe,

so gibt Δ wegen $\frac{E_{e2}}{E_{ez}} = \frac{E_{e2}^*}{E_{ez}^*}$

(das heißt, die Phasendifferenz zwischen E_2 und E_z ist Null) die Phasenverschiebung an, die der reflektierte Lichtstrahl erfährt.

2.3. Reflexion von linear polarisiertem Licht an einer Schichtstruktur

Betrachten wir eine Schichtstruktur bestehend aus einem absorbierenden Substrat, in unserem Fall Silizium, bedeckt mit einer transparenten Schicht (SiO_2) der Dicke d , auf die ein linear polarisierter Lichtstrahl trifft (siehe **Abb. 4**). Er ist dadurch charakterisiert, daß sich seine beiden Komponenten der elektrischen Feldstärke, parallel und senkrecht zur Einfallsebene, in Phasenlage befinden. Für ihn gilt:

Im allgemeinen Fall wird der reflektierte Strahl eine Phasen-

$$E_e = \begin{pmatrix} E_{e\parallel} \\ E_{e\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |E_e| \sin(\Psi_e) \\ |E_e| \cos(\Psi_e) \end{pmatrix} \quad (21)$$

drehung erfahren, so daß er gegenüber dem einfallenden, linear polarisierten Strahl elliptisch polarisiert ist. Unter Benutzung der Gleichung (20), der Fresnelschen Formeln (10) und (14) und der Beziehung (21) für den einfallenden linear polarisierten Strahl läßt sich das Verhältnis zwischen E_{r2} und E_{rZ} durch

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{r\perp}} = \frac{|E_{r\parallel}|}{|E_{r\perp}|} e^{i\Delta} = \tan(\mathbf{y}_r) e^{i\Delta} = \frac{E_{e\parallel}}{E_{e\perp}} = \frac{|\tilde{q}_{r\parallel}|}{|\tilde{q}_{r\perp}|} e^{i\Delta} = \tan(\mathbf{y}_e) \frac{|\tilde{q}_{r\parallel}|}{|\tilde{q}_{r\perp}|} e^{i\Delta} \quad (22)$$

beschreiben. Im Vergleich zu q_2 und q_Z in den Fresnelschen Formeln, die für ein System bestehend aus zwei Medien abgeleitet wurden, stellen \tilde{q}_{r2} und \tilde{q}_{rZ} komplexere Beziehungen dar, da es sich hier um ein System mit drei Medien, Luft, Siliziumdioxid und Silizium, handelt. Eine prinzipielle Beschreibung der Ableitung der Ausdrücke für \tilde{q}_{r2} und \tilde{q}_{rZ} erfolgt unter vereinfachten Annahmen im nächsten Abschnitt.

Wie in **Abb. 4** dargestellt, kommt es im Dreischichtsystem zu Mehrfachreflexionen in der dünnen transparenten bzw. semitransparenten Schicht. Die mehrfach reflektierten Strahlen liefern mit steigender Anzahl der Reflexionen abnehmende Beiträge zur Intensität des reflektierten Lichtes. Zur Vereinfachung der Berechnung der Intensität des reflektierten Lichtes werden nur zwei Beiträge berücksichtigt, erstens der Anteil des einfallenden Lichtes, der an der SiO_2 -Oberfläche reflektiert wird, und zweitens der durch das SiO_2 transmittierende Anteil, der an der SiO_2 -Si-Grenzfläche reflektiert wird und durch das SiO_2 und die SiO_2 -Luft-Grenzfläche transmittiert. Weiterhin wird angenommen, daß in der dünnen Schicht, im SiO_2 , keine Absorptionsverluste auftreten sollen. Für den senkrecht polarisierten Anteil der Feldstärke des reflektierten Lichtstrahles gilt unter diesen Annahmen:

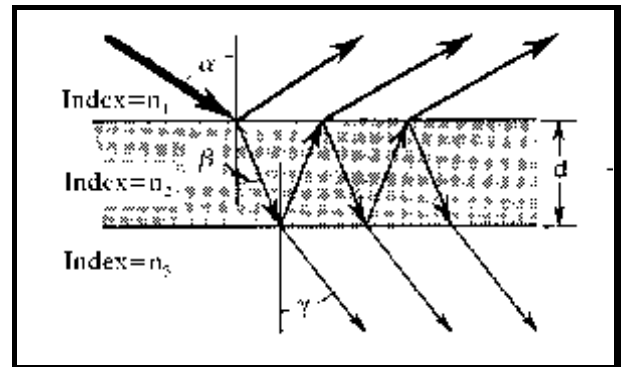


Abb.4 Mehrfachreflexionen und Transmissionen an einer dünnen transparenten Schicht.

$$E_{r\perp} = q_{r\perp}^{(1)} E_{e\perp} + q_{t\perp}^{(1)} E_{e\perp} q_{r\perp}^{(2)} (2 - q_{t\perp}^{(1)}) e^{-i\tilde{\Delta}} \quad (23)$$

Die Indizierung ⁽¹⁾ bezeichnet die Luft-SiO₂-Grenzfläche und die Indizierung ⁽²⁾ die SiO₂-Si-Grenzfläche. Dabei wurde davon Gebrauch gemacht, daß das Feldstärkeverhältnis für den transmittierenden Anteil beim Übergang von SiO₂ in Luft durch das Feldstärkeverhältnis für den Übergang von Luft in SiO₂ ausgedrückt werden kann

$$q_{tZ}^{(SiO_2 \text{ } \& \text{ } Luft)} = 2 \& q_{tZ}^{(Luft \text{ } \& \text{ } SiO_2)} = 2 \& q_{tZ}^{(1)} \quad (24)$$

(24) läßt sich unter Benutzung von (11) und (6) herleiten. Für das parallel polarisierte elektrische Feld gilt:

$$E_{r\parallel} = q_{r\parallel}^{(1)} E_{e\parallel} + q_{t\parallel}^{(1)} E_{e\parallel} q_{r\parallel}^{(2)} \left(2 - \frac{n_2}{n_1} q_{t\parallel}^{(1)}\right) e^{-i\tilde{\Delta}} \quad (25)$$

wobei

$$q_{t2}^{(SiO_2 \text{ } \& \text{ } Luft)} = \frac{n_2}{n_1} \left(2 \& \frac{n_2}{n_1} q_{t2}^{(Luft \text{ } \& \text{ } SiO_2)}\right) = \frac{n_2}{n_1} \left(2 \& \frac{n_2}{n_1} q_{t2}^{(1)}\right) \quad (26)$$

genutzt wurde. Die Beziehungen für die senkrechten und parallelen Komponenten des elektrischen Feldes, (8) und (13), lauten modifiziert

$$q_{tZ} = 1 \& q_{rZ} \quad \text{und} \quad (27)$$

$$q_{t2} = \frac{n_1}{n_2} (1 \& q_{r2}) \quad (28)$$

Mit ihnen folgt aus (25) und (26) für das Verhältnis der Feldstärkekomponenten (senkrecht und parallel zur Einfallsebene) des reflektierten Strahles

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{r\perp}} = \frac{E_{e\parallel} q_{r\perp}^{(1)} + (1 + q_{r\perp}^{(1)}) (1 - q_{r\perp}^{(1)}) q_{r\perp}^{(2)} e^{-i\tilde{\Delta}}}{E_{e\perp} q_{r\parallel}^{(1)} + (1 + q_{r\parallel}^{(1)}) (1 - q_{r\parallel}^{(1)}) q_{r\parallel}^{(2)} e^{-i\tilde{\Delta}}} \quad (29)$$

Die Phasenverschiebung $\tilde{\Delta}$ ermittelt sich aus dem größeren optischen Weg des an der SiO₂-Si-Grenzfläche reflektierten Strahles zu.

$$\tilde{\Delta} = \frac{4pn_2d}{I \cos(b)} = \frac{4pn_2d}{I \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(a)\right)^2}} \quad (30)$$

Sie hängt von der Dicke d und der Brechzahl n_2 der SiO_2 -Schicht, von der Wellenlänge I und dem Einfallswinkel a ab. Im zweiten Teil der Formel wurde das Brechungsgesetz verwendet. Gemäß (6), (10), (11), (14), (15) und (22) gilt für die Gleichung (29)

$$\tan(\mathbf{y}_r) = \tan(\mathbf{y}_e) f_1(n_1, n_2, n_3, d, a) \quad (31)$$

und

$$e^{\Delta} = f_2(n_1, n_2, n_3, d, a) \quad (32)$$

Bei der Ellipsometrie werden der Ausfallsazimut \mathbf{y}_r und die Phase Δ meßtechnisch erfaßt. Die Brechzahl der Luft n_1 ist bekannt, der Einfallswinkel a und der Einfallszimut \mathbf{y}_e werden eingestellt. Von den übrigen drei Größen n_2 , d und n_3 können bei Kenntnis der einen die beiden anderen durch dieses Verfahren bestimmt werden. Sind die optischen Konstanten des Substrates (Silizium) bekannt, so können Dicke und Brechzahl (Sie charakterisiert die Schichteigenschaft) der Deckschicht (SiO_2) ermittelt werden.

Für dieses System ist in **Abb. 5** die $\Delta - \mathbf{y}_r$ -Trajektorie gezeichnet. Für die Brechzahl von SiO_2 hängt jeder Punkt dieser Kurve parametrisch von der Oxiddicke ab. Es ist eine geschlossene Kurve, was bedeutet, daß es für ein $\Delta - \mathbf{y}_r$ -Verhältnis mehrere mögliche Oxiddicken gibt. Deshalb ist es notwendig, den Bereich der Schicht-dicke zu kennen. Unter Umständen ist die Brechzahl der Schicht nicht bekannt. Wie in **Abb. 6** gezeigt, ergeben sich unterschiedliche Verläufe im $\Delta - \mathbf{y}_r$ -Diagramm für verschiedene Schichtmaterialien. Die dargestellten Kurven-

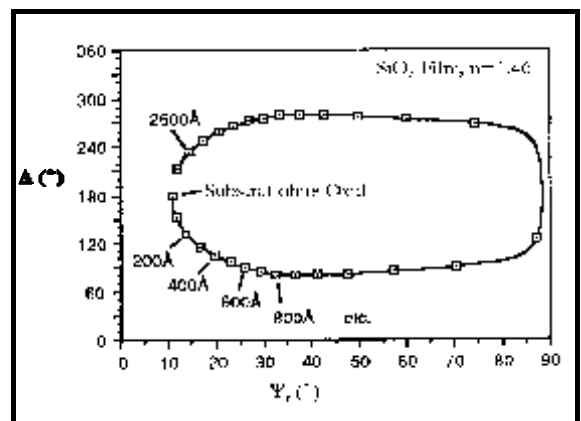


Abb. 5 $\Delta - \mathbf{y}_r$ -Trajektorie für SiO_2 auf Si gemessen bei einem Einfallswinkel von 70° und einer Wellenlänge von 632.8nm .

gelten für folgende Schichten auf Silizium: SiO_2 - $n=1.46$, Photolack - $n=1.65$, Si_3N_4 - $n=2.0$. Wie bereits erwähnt,

ist dieses Verfahren auch geeignet um semitransparente Schichten, d. h., Schichten die einen Teil der Strahlung absorbieren, auszumessen. Das Auswerteverfahren basiert ebenfalls auf dem beschriebenen Formalismus, jedoch ist mit komplexen Brechzahlen zu operieren. Verallgemeinert gesagt, ist die Ellipsometrie zum Messen von Schichtdicke und (oder) optischen Konstanten "transparenter" Mehrschichtsystemen geeignet, wobei alle Schichtdicken und Brechzahlen des gesamten Systems bis auf zwei bekannt sein müssen. So können zum Beispiel bei einer Struktur mit drei Deck-

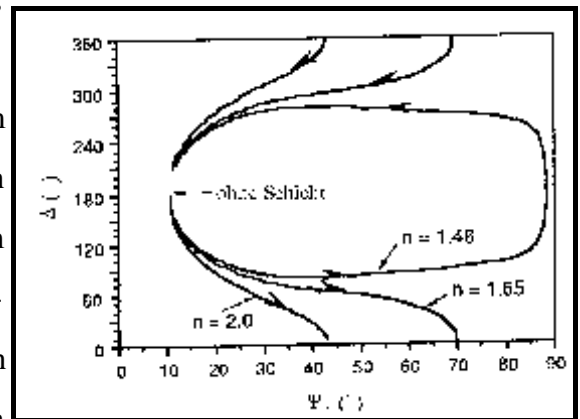


Abb. 6 Trajektorien für verschiedene Schichten auf einkristallinem Silizium.

schichten die Dicken der unteren und mittleren Schicht bestimmt werden, unter der Voraussetzung, daß die Dicke der oberen Schicht sowie alle optischen Konstanten des Systems bekannt sein müssen.

3. Prinzipieller Aufbau des Meßgerätes

Ein Ellipsometer besteht aus den folgende Baugruppen: monochromatische Lichtquelle, ein optisches Element zur Erzeugung linear polarisierten Lichtes, ein optisches Element zur Umwandlung linear polarisierten Lichtes in elliptisch polarisiertes Licht, eine reflektierende Probe (auszumessende Schichtstruktur), eine optische Baugruppe zur Ermittlung des Zustandes der Polarisation des reflektierten Lichtes, einen Detektor zur Messung der Intensität des reflektierten Lichtes (in bestimmten Geräten auch genutzt zum Nullpunktabgleich der Intensität) und eine Auswerteeinheit zur Berechnung der Meßgrößen (Schichtdicke und Brechzahl) aus den gemessenen Polarisationswinkel (Ausfallazimut und Phasenverschiebung).

3.1. Die Lichtquelle

Im allgemeinen liefern die Lichtquellen unpolarisiertes Licht. Es entsteht durch die Überlagerung vieler Einzelbeiträge, die zufällig orientiert sind. Monochromatisches Licht erhält man bei Verwendung eines Lasers oder einer Bogenlampe bzw. durch Benutzung einer polychromatischen Lichtquelle mit anschließender Filterung. Für Einwellenlängen - Ellipsometer werden heutzutage Laser verwendet.

3.2. Polarisatoren und Analysatoren

Nehmen wir an, ein Polarisator wird mit linear polarisiertem Licht mit einem Polarisationswinkel von 45° bestrahlt. Stimmt die Polarisationsrichtung des Polarisators nicht mit dieser 45° -Richtung überein, so kann das Licht in eine parallele und eine senkrechte Komponente zur Polarisationsrichtung des Polarisators zerlegt werden. Die Strahlkomponente parallel zur Polarisationsrichtung wird ungehindert durch den Polarisator gelassen, die senkrechte vollständig blockiert. Das ist in **Abb. 7** veranschaulicht. In Abbildungsteil A stimmen Polarisationsrichtung des Polarisators und Polarisationswinkel der Lichtwelle überein, so daß das Licht vollständig transmittieren kann. In B und C weicht die Polarisatorachse vom Polarisationswinkel der Welle ab. Es kann nur die zur Polarisatorachse parallele Komponente passieren. In D ist der Fall gezeigt, bei der die Polarisatorachse und die Polarisationsrichtung im rechten Winkel zueinander stehen. Der Polarisator blockiert vollständig die Transmission des Lichtes. Die Intensität beträgt hinter dem Polarisator Null.

Es werden zwei Anwendungsfälle unterschieden:

- (1) der Polarisator wird genutzt, um unpolarisiertes Licht in polarisiertes zu wandeln, man spricht vom "Polarisator",
- und (2) er wird genutzt, um den Zustand des polarisierten Lichtes zu bestimmen, indem der Polarisator so ausgerichtet wird, daß er kein Licht hindurchläßt, man bezeichnet ihn als "Analysator".

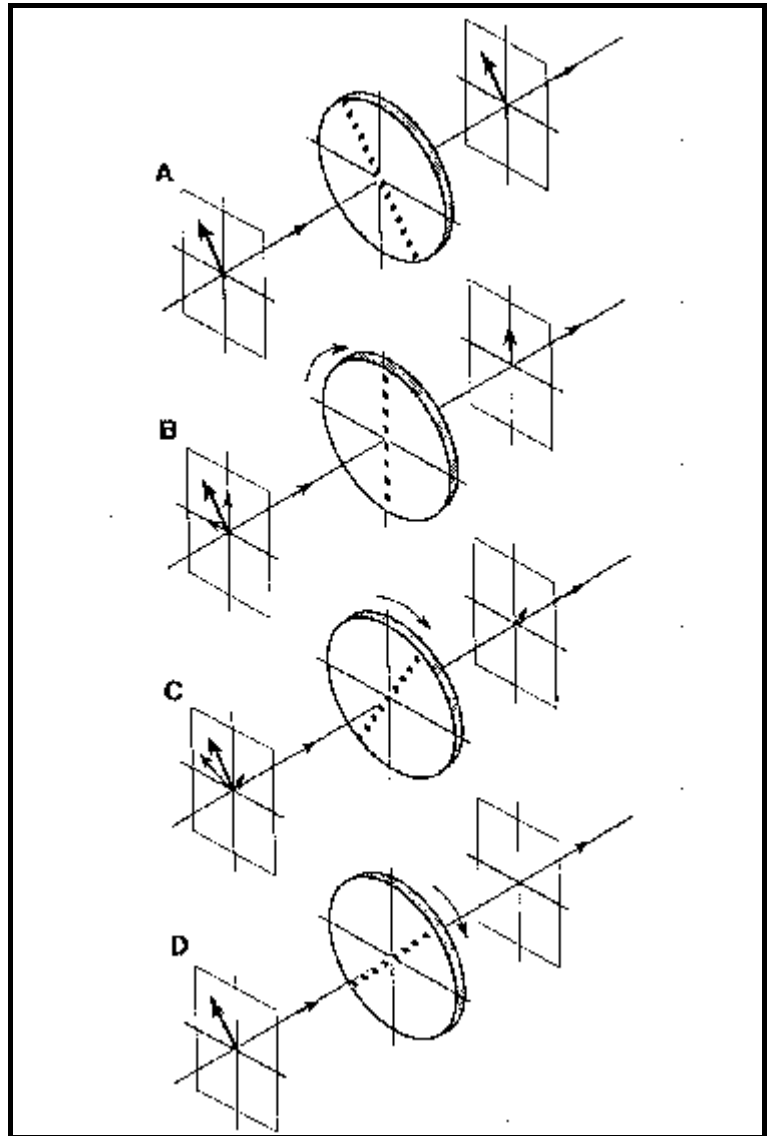


Abb.7 Wirkung des Polarisators (Kreisscheibe) auf die Transmission einer einfallenden Lichtwelle. Die Polarisationsachse ist die gestrichelte Linie.

3.3. Der Kompensator

Der Kompensator (quarter wave plate - QWP) ist ein anisotropes optisches Element. Er besitzt zwei senkrecht aufeinanderstehende Achsen mit unterschiedlichen Transmissionsgeschwindigkeiten. Die Komponente der Lichtwelle längst der schnellen Achse passiert schneller dieses optische Element als die andere Komponente. Die Wirkung des QWP besteht darin, daß z.B. eine linear polarisierte Lichtwelle, ihre zwei Komponenten besitzen die gleiche Phasenlage, im allgemeinen in eine elliptisch polarisierte Welle (beide Komponenten haben eine Phasendifferenz zueinander) beim Passieren dieses Elementes gewandelt wird. Durch die Wahl der Dicke können verschiedene Phasenverschiebungen realisiert werden. In der Ellipsometrie wird ein Kompensator mit einer Phasenverschiebung von 90° (quarter wave plate) verwendet.

In **Abb. 8** ist eine QWP dargestellt. Die dicke gestrichelte Linie charakterisiert die schnelle Achse und die dünne gestrichelte Linie die langsame Achse. Wie der Abbildungsteil A zeigt, bewirkt bei horizontaler Lage der schnellen Achse die QWP, daß die horizontale Komponente der transmittierten Lichtwelle deren vertikaler Komponente um 90° in der Phase voraus ist. Bildteil C zeigt den umgekehrten Fall. Im Teil B wird der Fall demonstriert, bei dem die ursprüngliche Welle (ohne Zerlegung in die beiden Komponenten) einen Polarisationswinkel besitzt, der mit der Lage der schnellen Achse der QWP übereinstimmt. Beide Komponenten werden in gleichem Maße verzögert, so daß keine Änderung der Phasenlage zueinander auftritt. Bei Übereinstimmung des Polarisationswinkels der Originalwelle mit der langsamen Achse (Bildteil D) tritt das gleiche Verhalten wie in B auf. Wie die Abbildung zeigt, kann die Phasenlage der vertikalen zur horizontalen Komponente von -

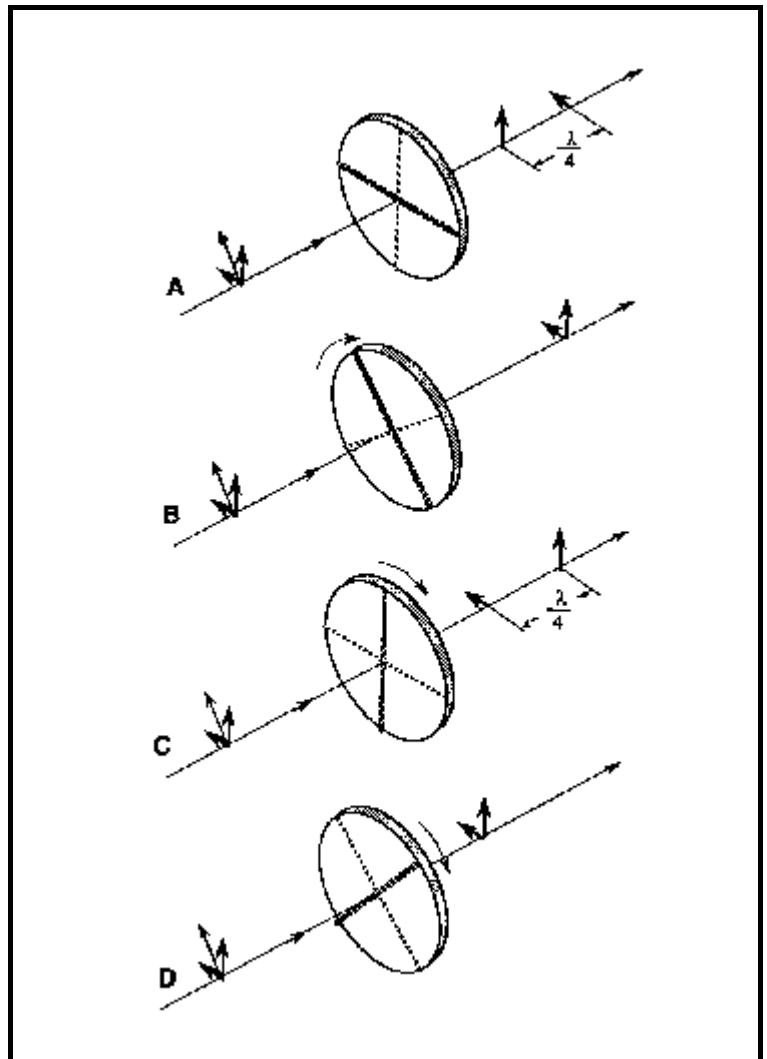


Abb.8 Einfluß der Orientierung der QWP auf die Phasenlage der transmittierten Lichtwelle. & & - schnelle Achse,)) - langsame Achse.

90° (Bildteil A) über 0° (Bildteile B und D) auf $+90^\circ$ (Bildteil C) geändert werden.

3.4. Reflexion am zu messenden Substrat

Im allgemeinen kann eine Reflexion eine Phasenverschiebung beider Komponenten von 0 bis 360° bewirken. Weiterhin tritt eine Abschwächung der Amplituden der parallelen und senkrechten Komponente auf, die in der Regel unterschiedlich ist. Sie bestimmt den Ausfallazimut in Bezug auf den Einfallazimut.

3.5. Der Detektor

Zur Messung der Intensität des reflektierten Strahles wird im Ellipsometer ein Photoverstärker genutzt. Er dient zur Feststellung der Null-Intensität bei Ausrichtung des Analysators und des Kompensators.

3.6. Aufbau des Ellipsometers

Den prinzipiellen Aufbau des Ellipsometers gemäß des oben beschriebenen Funktionprinzipes veranschaulicht die **Abb. 9**. Eine auszumessende Schichtstruktur wird mit monochromatischem, linear polarisiertem Licht bestrahlt. Als Lichtquelle dient ein Laser, dessen Strahlung mit Hilfe eines Polarisator linear polarisiert wird. Das von der Probe reflektierte Licht ist gewöhnlich elliptisch polarisiert. Es wird mit Hilfe eines Kompensators, der eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Komponenten

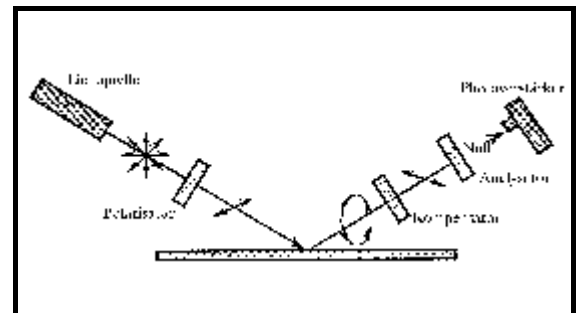


Abb. 9 Prinzipieller Aufbau eines Ellipsometers zur Bestimmung des Probeneinflusses bei der Reflexion linear polarisierten Lichtes.

von $\pi/4$ erzeugt, in linear polarisiertes Licht konvertiert. D.h., es werden die Komponenten in Richtung der Hauptachsen der Ellipse in die gleiche Phasenlage gebracht. Der hinter dem Kompensator befindliche Analysator wird senkrecht zum linear polarisierten Licht ausgerichtet, so dass die Intensität des den Analysator transmittierenden Lichtes Null wird. Das Erreichen dieses Zustandes wird durch das Photometer erfaßt. Aus diesen Winkeleinstellungen des Analysators und des Kompensators können die Phasenverschiebung Δ und der Ausfallazimut γ_r

ermittelt werden.

Aus Gründen der einfacheren Auswertung wird in der Praxis eine etwas andere Anordnung benutzt. Sie ist in **Abb. 10** zu sehen. Im Gegensatz zu der vorher beschriebenen Anordnung wird die Probe mit elliptisch polarisiertem Licht bestrahlt. Dazu befindet sich ein Strahlungsbereich des Polarisator, zur Erzeugung linear polarisierten Lichtes aus unpolarisiertem, und der Kompensator, zur Wandlung dieses linear polarisierten Lichtes in elliptisch polarisiertes. Im Bereich des reflektierten Lichtes befinden sich der Analysator und der Detektor. Der Kompensator ist fest justiert mit einem Winkel von 45° zur Einfallsebene. Polarisator und Analysator sind drehbar, um die Null-Intensität gemessen durch den Detektor zu realisieren. Aus beiden Winkeleinstellungen können die Phasenverschiebung Δ und der Ausfallsazimut γ_r berechnet werden. Die Drehung von Analysator und Polarisator wird in modernen Geräten durch einen Mikroprozessor gesteuert und die Auswertung der Meßwerte erfolgt mit einem Computer. Ein solches Ellipsometer wird als "Rotating Null Instrument" bezeichnet.

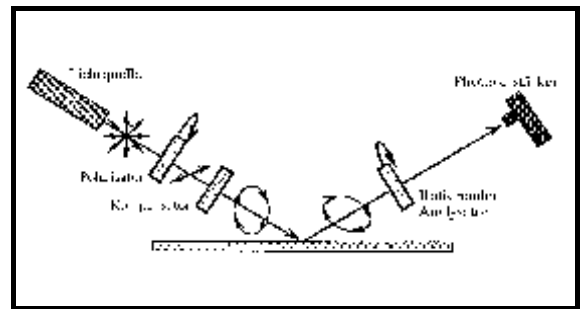


Abb. 10 Prinzipieller Aufbau eines "Rotating Null Element"-Ellipsometer.

Der Kompensator ist fest justiert mit einem Winkel von 45° zur Einfallsebene. Polarisator und Analysator sind drehbar, um die Null-Intensität gemessen durch den Detektor zu realisieren. Aus beiden Winkeleinstellungen können die Phasenverschiebung Δ und der Ausfallsazimut γ_r berechnet werden. Die Drehung von Analysator und Polarisator wird in modernen Geräten durch einen Mikroprozessor gesteuert und die Auswertung der Meßwerte erfolgt mit einem Computer. Ein solches Ellipsometer wird als "Rotating Null Instrument" bezeichnet.

3. Aufgaben zur Vorbereitung

- 3.1. Berechnen Sie die Brewster-Winkel für die Lichtreflexion an folgenden Systemen: Luft-SiO₂ (n=1,46), Luft-Fotolack (n=1,65) und Luft-Si₃N₄ (n=2,0)!
- 3.2. Beschreiben Sie das Schichtdickenmeßverfahren für transparente Schichten, basierend auf der Intensitätsmessung des infolge von Mehrfachreflexionen interferierenden reflektierten Lichtes!

4. Praktikumsaufgaben

- 4.1. Messen Sie die Dicke der transparenten Schichten im Zentrum der Siliziumscheiben I und II mittels der Interferenzmethode und mittels Ellipsometrie! Vergleichen Sie die Meßwerte!

- 4.2. Führen Sie für beide Proben die ellipsometrische Schichtdickenmessung unter Vorgabe des Brechungsindex für SiO_2 sowie bei gleichzeitiger Messung des Brechungsindex der Schicht durch! Diskutieren Sie das Resultat!
- 4.3. Bestimmen Sie die radiale Schichtdickenverteilung längst und quer zur Hauptphase. Berechnen Sie die Standardabweichung und bewerten Sie die Schichtdickenhomogenität!

5.Literatur

- [1] A user's guide to Ellipsometry
Tompkins, H.G.: Academic Press, 1993
- [2] Infrared spectroscopic Ellipsometry
Röseler, A.: Akademie-Verlag, Berlin 1990

Erstellt von Dr.rer.nat. J.-P. Zöllner