

# Apparative Methoden in der Physikalischen Chemie

## Versuch Ellipsometrie

4. Mai 2009

### 1 Grundlagen

Die Ellipsometrie ermöglicht es, ohne weiteren präparativen Aufwand, die Schichtdicke sehr dünner Filme zu bestimmen. Als Proben eignen sich Mehrschichtensysteme, zum Beispiel ein auf einen oxidierten Siliziumwafer aufgebracht Polyelektrolytmultischichtenfilm. Es wird hierbei ausgenutzt, daß sich der Polarisationszustand polarisierten Lichts durch Reflexion an einem Schichtsystem ändert. Diese Änderung beruht auf Interferenz ein- und mehrfach reflektierter Teilstrahlen und ist somit von Dicke und Brechungsindex der einzelnen Schichten abhängig.

#### 1.1 Polarisiertes Licht

Der zeitliche Verlauf monochromatischen Lichts, das heißt Licht, das nur aus Wellen einer Wellenlänge  $\lambda$  besteht, läßt sich anhand der Größe der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  oder der magnetischen Flußdichte  $\vec{B}$  beschreiben. Die Beträge beider Größen ändern sich zeitlich mit einem sinusförmigen Verlauf. Elektrische Feldstärke und magnetische Flußdichte stehen senkrecht aufeinander, es gilt

$$\vec{E} \cdot \vec{B} = 0. \quad (1)$$

Daher reicht die Betrachtung einer Komponente zur Beschreibung aus. Die elektrische Feldstärke einer elektromagnetischen Welle läßt sich allgemein ausdrücken durch:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}z + \delta) \quad (2)$$

Hierbei ist  $\vec{k}$  der Wellenvektor, der die Ausbreitungsrichtung der Welle beschreibt. Für  $\vec{k}$  gilt:

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{und} \quad \vec{E} \cdot \vec{k} = 0 \quad (3)$$

Letztere Beziehung spiegelt wieder, daß es sich bei elektromagnetischen Wellen um transversale Wellen handelt. Mit der Phasenverschiebung  $\delta$  ergibt sich die Amplitude für den Zeitpunkt

$t = 0$ . Bei  $\omega$  handelt es sich um die Kreisfrequenz, die durch  $\omega = 2\pi\nu$  mit der Frequenz der Welle verknüpft ist. Der elektrische Feldvektor kann in zwei Komponenten zerlegt werden, für die dann gilt:

$$E_j = E_{0j} \cos(\omega t - k \cdot z + \delta_j) \quad j = x, y. \quad (4)$$

Durch Verwendung einer komplexen Schreibweise erhält man hieraus

$$E_j = E_{0j} e^{i\delta_j} e^{\omega t - kz}. \quad (5)$$

Für optische Messungen spielt allerdings nur das Amplitudenverhältnis eine Rolle, daher verwendet man meistens den JONES-Vektor, der die zeitliche und räumliche Abhängigkeit nicht berücksichtigt:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\delta_x} \\ E_{0y} e^{i\delta_y} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Das Verhältnis der beiden Amplituden, sowie die Phasendifferenz  $\delta_x - \delta_y$  definiert den Polarisationszustand. Die verschiedenen Möglichkeiten sind in Abb. 1 gezeigt.











Phasendifferenz	Polarisation		Phasendifferenz	Polarisation	
	$E_{0x} \neq E_{0y}$	$E_{0x} = E_{0y}$		$E_{0x} \neq E_{0y}$	$E_{0x} = E_{0y}$
$\delta_x - \delta_y = 0^\circ$	 linear		$\delta_x - \delta_y = 180^\circ$	 linear	
$0^\circ < \delta_x - \delta_y < 90^\circ$	 elliptisch		$180^\circ < \delta_x - \delta_y < 270^\circ$	 elliptisch	
$\delta_x - \delta_y = 90^\circ$	 elliptisch	 zirkular	$\delta_x - \delta_y = 270^\circ$	 elliptisch	 zirkular
$90^\circ < \delta_x - \delta_y < 180^\circ$	 elliptisch		$270^\circ < \delta_x - \delta_y < 360^\circ$	 elliptisch	

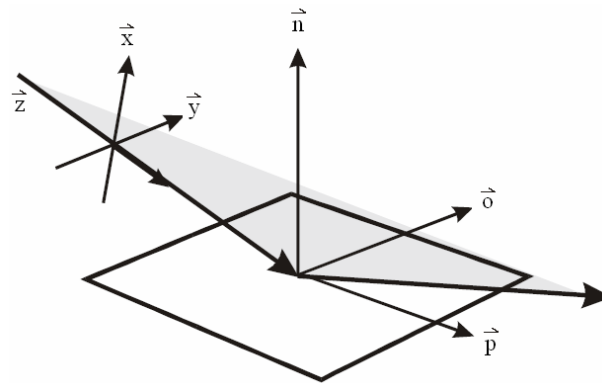
Abbildung 1: Mögliche Zustände polarisierten Lichts

## 1.2 Ellipsometrische Grundgleichung

Um die Wechselwirkung polarisierten Lichts mit einer Probe zu analysieren, betrachtet man die Veränderung des Polarisationszustandes, also den Unterschied zwischen der Polarisation des einfallenden Lichts und der des austretenden Lichts. Weil die zeitliche Abhängigkeit für die Polarisation keine Rolle spielt, können die JONES-Vektoren (Gleichung (6)) verwendet werden:

$$\begin{aligned}\vec{E}^{Ein} &= \begin{pmatrix} E_{0x}^{Ein} e^{i\delta_x^{Ein}} \\ E_{0y}^{Ein} e^{i\delta_y^{Ein}} \end{pmatrix}, & \text{Einfallende Welle} \\ \vec{E}^{Aus} &= \begin{pmatrix} E_{0x}^{Aus} e^{i\delta_x^{Aus}} \\ E_{0y}^{Aus} e^{i\delta_y^{Aus}} \end{pmatrix}, & \text{Austretende Welle}\end{aligned}\quad (7)$$

Das Koordinatensystem zur Beschreibung der Polarisation wird so gewählt, daß die y-Achse parallel zur Probenoberfläche liegt und die z-Achse in Ausbreitungsrichtung der Welle zeigt (s. Abb. 2). Die Wechselwirkung wird repräsentiert durch die komplexen Reflexionskoeffizienten



**Abbildung 2:** Darstellung der Koordinatensysteme zur Beschreibung des polarisierten Lichts (x, y, z) und der Probe (n, o, p).

$R_x$  und  $R_y$ , die definiert sind als

$$R_j = \frac{|E_{0j}^{Aus}|}{|E_{0j}^{Ein}|} e^{i(\delta_j^{Aus} - \delta_j^{Ein})} \quad j = x, y. \quad (8)$$

Zur Vereinfachung führt man als Abkürzung die ellipsometrischen Winkel  $\Psi$  und  $\Delta$  ein als

$$\tan \Psi = \frac{\frac{|E_{0x}^{Aus}|}{|E_{0x}^{Ein}|}}{\frac{|E_{0y}^{Aus}|}{|E_{0y}^{Ein}|}} \quad (9)$$

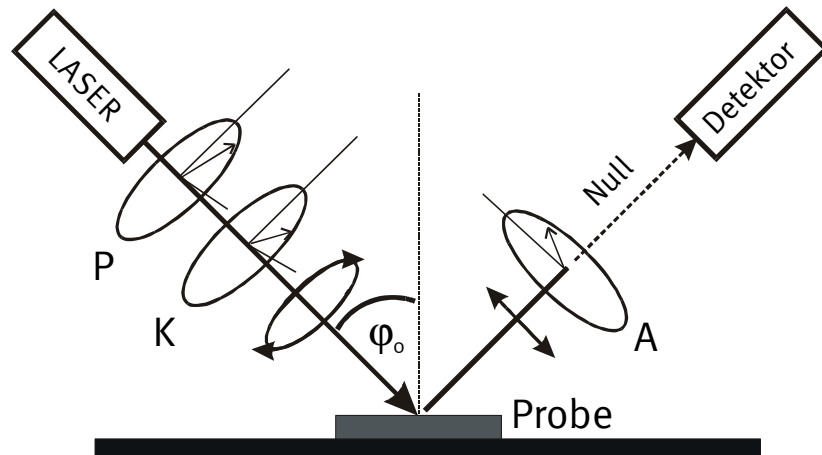
$$\Delta = (\delta_x^{Aus} - \delta_y^{Aus}) - (\delta_x^{Ein} - \delta_y^{Ein}). \quad (10)$$

Durch Einsetzen der ellipsometrischen Winkel für die Wechselwirkung mit der Probe charakteristische Verhältnis  $\frac{R_x}{R_y}$  ergibt sich die *ellipsometrische Grundgleichung*:

$$\frac{R_x}{R_y} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad \text{Ellipsometrische Grundgleichung.} \quad (11)$$

### 1.3 Aufbau eines Ellipsometers

Den schematischen Aufbau eines Ellipsometers zeigt Abb. 3. Die erste Komponente eines Ellipsometers ist das lichterzeugende System. Als Lichtquellen werden für die sogenannte spektroskopische Ellipsometrie Bogenlampen eingesetzt, weil sie ein kontinuierliches Spektrum bieten und ansonsten Laser, die eine hohe Intensität bereitstellen. Wird ein Laser verwendet, so besteht das lichterzeugende System meist zusätzlich noch aus einem  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen. Das  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen ist ein optisches Bauteil mit einer schnellen und einer langsamen optischen Achse, woraus bei einem Winkel von  $45^\circ$  aus dem bei einem Laser linear polarisiertem Lichtstrahl ein zirkular polarisierter Lichtstrahl wird. So wird gewährleistet, daß die Intensität nach weiteren die Po-



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau eines Ellipsometers zur Nullellipsometrie mit Polarisator (P), Kompensator (K) und Analysator (A)

larisation verändernden Elementen unabhängig von der Größe dieser Veränderung ist. Das in der Strahlrichtung folgende Element ist ein Polarisator, der für einfallendes Licht eine Durchlaßrichtung und eine Auslöschrichtung aufweist, die senkrecht aufeinander stehen. Der Winkel zwischen den Polarisatorachsen und denen des Laborsystems ist frei wählbar und wird im folgenden als  $\alpha_P$  bezeichnet. Die Wirkung auf die Feldvektoren des einfallenden Lichts, also das Auslösch einer Polarisationskomponente läßt sich mittels folgender JONES-Matrix in Eigen-darstellung berechnen.

$$\hat{T}_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Beim Kompensator handelt es sich um ein weiteres  $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen mit einem wählbaren Winkel der optischen Achsen von  $\alpha_K$ , die entsprechende Matrix hierfür lautet

$$\hat{T}_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Eine Komponente der Polarisation wird also um  $90^\circ$  phasenverschoben. Hierauf folgt die Probe, die der Polarisation entsprechend den Reflexionskoeffizienten ändert, so daß sich als Matrix

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{pmatrix} \quad (14)$$

ergibt. Die Hauptachsen der Probe (n, o, p; Abb. 2) definieren das Laborsystem, auf das sich alle anderen Winkel  $\alpha_j$  beziehen. Nach der Probe folgt ein Analysator, also ein zur Bestimmung des Polarisationszustandes eingesetzter Polarisator, für den die gleiche Matrix  $\hat{T}_P$  gilt. Der Winkel des Analysators  $\alpha_A$  kann unabhängig eingestellt werden. Das letzte Element eines Ellipsometers ist eine Photodiode als Detektor zur Messung der Intensität, die den Analysator verläßt.

Um den elektrischen Feldvektor des den Analysator verlassenden Lichts zu berechnen, müssen die oben genannten Matrizen auf den Vektor des einfallenden Lichts angewandt werden. Da es sich aber um Matrizen in der Eigendarstellung handelt muß der Vektor mittels einer systembezogenen Drehmatrix der Form

$$\hat{D}(\alpha_j) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_j & \sin \alpha_j \\ -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j \end{pmatrix} \quad (15)$$

in die Basisvektoren des Eigensystems überführt und anschließend in das Laborsystem zurückgeführt werden. Es ergibt sich

$$\vec{E}^{Aus} = \hat{D}(-\alpha_A) \hat{T}_P \hat{D}(\alpha_A) \hat{P} \hat{D}(-\alpha_K) \hat{T}_K \hat{D}(\alpha_K) \hat{D}(-\alpha_P) \hat{T}_P \hat{D}(\alpha_P) \vec{E}^{Ein}. \quad (16)$$

In einer speziellen Form der Ellipsometrie, der Nullellipsometrie, die im folgenden betrachtet wird, werden bei festem Kompensatorwinkel  $\alpha_K$  sowohl der Polarisatorwinkel  $\alpha_P$  als auch der Analysatorwinkel  $\alpha_A$  so eingestellt, daß die Intensität im Photodetektor Null ist. Die Transformation des Analysatorsystems in das Laborsystem wird also überflüssig. Nach mehreren Umformungen wird so aus Gleichung (16)

$$\vec{E}^{aus} = \hat{T}_A(\Omega_1 + \Omega_2)(E_p^E \cos \alpha_P + E_s^E \sin \alpha_P), \text{ mit} \quad (17)$$

$$\Omega_1 = R_x \cos \alpha_A (\cos \alpha_K \cos(\alpha_K - \alpha_P) - i \sin \alpha_K \sin(\alpha_K - \alpha_P)) \quad (18)$$

$$\Omega_2 = R_y \sin \alpha_A (\sin \alpha_K \cos(\alpha_K - \alpha_P) + i \cos \alpha_K \sin(\alpha_K - \alpha_P)) \quad (19)$$

Die Intensität im Detektor verschwindet wenn  $\Omega_1 = -\Omega_2$  ist, daraus folgt für das Verhältnis der Reflexionskoeffizienten  $\frac{R_x}{R_y}$

$$\frac{R_x}{R_y} = -\tan \alpha_A \frac{\tan \alpha_K + i \tan(\alpha_K - \alpha_P)}{1 - i \tan \alpha_K \tan(\alpha_K - \alpha_P)}. \quad (20)$$

Wird für den Kompensator ein fester Winkel von  $\alpha_K = -45^\circ$  gewählt, vereinfacht sich diese Gleichung zu

$$\frac{R_x}{R_y} = -\tan \alpha_A e^{i(2\alpha_P + \frac{\pi}{2})}. \quad (21)$$

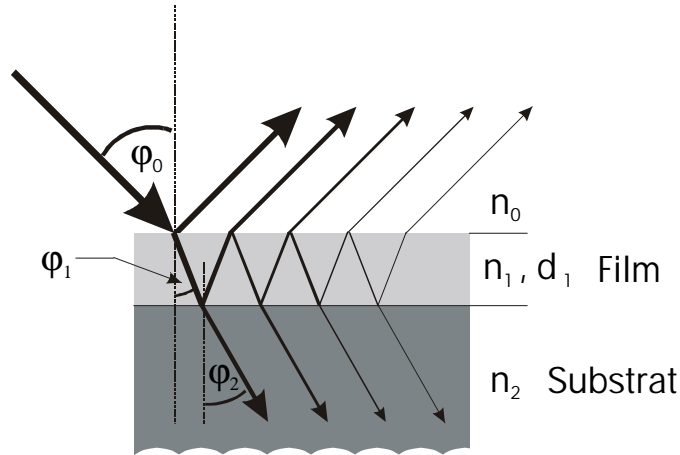
Ein Vergleich mit Gleichung (11) zeigt, daß gilt

$$\Psi = |\alpha_A| \quad \text{und} \quad \Delta = 2\alpha_P \pm 90^\circ. \quad (22)$$

Die in Abschnitt 1.2 definierten ellipsometrischen Winkel sind bei der Nullellipsometrie also einfach durch Ablesen der Winkel von Analysator und Polarisator für den Fall der Intensitätsauslöschung bestimmbar.

## 1.4 Reflexion und Brechung an Schichtsystemen

Die Polarisation des den Analysator erreichenden Lichts wird durch teilweise mehrfache Brechung und Reflexion an Grenzflächen der Probe bestimmt. Der einfachste Fall ist eine Probe mit zwei Grenzflächen, nämlich denen zwischen Luft und Probe und zwischen Probe und (als halbumendlich angenommenen) Substrat, s. Abb. 4. Wählt man die Achsen zur Beschreibung



**Abbildung 4:** Modell der Reflexion an einem dünnen Film auf einem Substrat

der Polarisation so, daß die  $y$ -Achse parallel zur Probenebene steht (s. Abb. 2), ergeben die für Brechung und Reflexion an Grenzschichten geltenden FRESNELSchen Gleichungen für die Grenzfläche Luft/Probe die Reflexionskoeffizienten

$$R_{01x} = \frac{n_1 \cos \varphi_0 - n_0 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_0 + n_0 \cos \varphi_1}$$

$$\Leftrightarrow R_{01x} = \frac{n_1 \cos \varphi_0 - n_0 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}}{n_1 \cos \varphi_0 + n_0 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
R_{01y} &= \frac{n_0 \cos \varphi_0 - n_1 \cos \varphi_1}{n_0 \cos \varphi_0 + n_1 \cos \varphi_1} \\
\Leftrightarrow R_{01y} &= \frac{n_0 \cos \varphi_0 - n_1 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}}{n_0 \cos \varphi_0 + n_1 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}}.
\end{aligned} \tag{24}$$

An der Grenzfläche Probe/Substrat gilt

$$\begin{aligned}
R_{12x} &= \frac{n_2 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2} \\
\Leftrightarrow R_{12x} &= \frac{n_2 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0} - n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}}{n_2 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0} + n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0}}
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
R_{12y} &= \frac{n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2} \\
\Leftrightarrow R_{12y} &= \frac{n_1 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0} - n_2 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_2^2} \sin^2 \varphi_0}}{n_1 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_1^2} \sin^2 \varphi_0} + n_2 \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_2^2} \sin^2 \varphi_0}}.
\end{aligned} \tag{26}$$

Hierbei ist  $\varphi_0$  der Einfallswinkel und  $n_j$  sind die Brechungskoeffizienten. Durch kohärente Überlagerung der reflektierten Teilstrahlen ergeben sich die Reflexionskoeffizienten des Gesamtschichtsystems als

$$R_x = \frac{R_{01x} + R_{12x} e^{-i2\beta}}{1 + R_{01x} R_{12x} e^{-i2\beta}} \tag{27}$$

$$R_y = \frac{R_{01y} + R_{12y} e^{-i2\beta}}{1 + R_{01y} R_{12y} e^{-i2\beta}}. \tag{28}$$

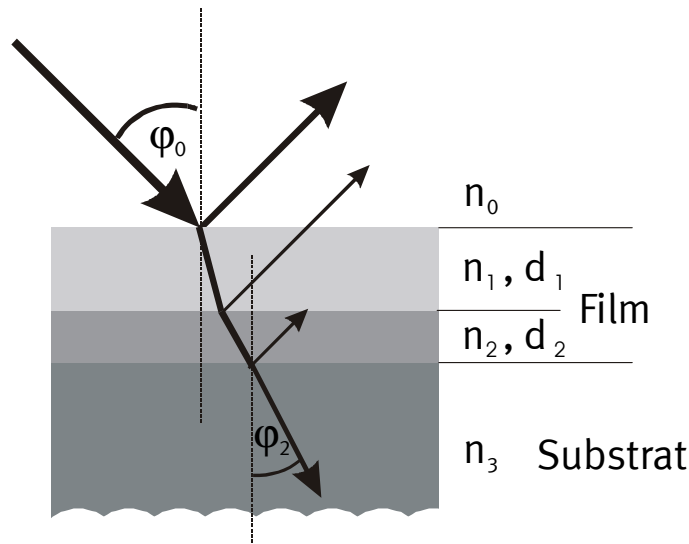
Die Phasenverschiebung  $\beta$  ist abhängig von der Schichtdicke der Probe  $d_1$  und gegeben als

$$\beta = 2\pi \frac{d_1}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \varphi_0}. \tag{29}$$

Durch Division von Gleichung (27) durch Gleichung (28) und Vergleich mit Gleichung (11) kann ein Zusammenhang zwischen den durch Nulllellipsometrie ermittelten ellipsometrischen Winkeln und dem Brechungsindex  $n_1$  sowie der Schichtdicke  $d_1$  der Probe hergestellt werden.

Ist der Brechungsindex des Substrats bekannt, erhält man zwei Funktionen zweier Variablen  $\Delta(n_1, d_1)$  und  $\Psi(n_1, d_1)$ . Aus den Schnittpunkten der Höhenlinien für die gemessenen Werte für  $\Delta$  und  $\Psi$  erhält man mögliche Wertepaare für Schichtdicke und Brechungsindex. Aufgrund der zugrundeliegenden trigonometrischen Funktionen tritt allerdings eine Periodizität auf, zudem liefern die Höhenlinien üblicherweise mehrere Schnittpunkte. Eine Kenntnis über den Bereich, in dem die zu bestimmenden Werte von  $n_1$  und  $d_1$  liegen ist daher nötig.

**Mehrschichtsysteme** Viele bei der Ellipsometrie verwendeten Substrate sind oberflächlich oxidiert. Daher handelt es sich nicht mehr um ein einschichtiges System auf halbbunndlichem Substrat, sondern um ein Zweischnittensystem (Abb. 5). Die Gleichungen (27) und (28) reichen



**Abbildung 5:** Modell der Brechung und Reflexion an einer zweischichtigen Probe

dann zur Beschreibung der Polarisationsänderung nicht mehr aus.

Anstelle der expliziten Herleitung wie beim Zweischnittensystem bietet sich hier aus Gründen der Übersichtlichkeit eine Matrixmultiplikation der Form

$$\hat{S}_j = \hat{G}_{01j} \hat{L}_1 \hat{G}_{12j} \hat{L}_2 \hat{G}_{23j} \quad j = x, y \quad (30)$$

an. Dabei sind die *Grenzflächenmatrizen*  $\hat{G}_{ik}$  definiert als

$$\hat{G}_{ikj} = \frac{1}{t_{ikj}} \begin{pmatrix} 1 & r_{ikj} \\ r_{ikj} & 1 \end{pmatrix} \quad j = x, y, \quad (31)$$

wobei die FRESNELSchen Transmissions- und Reflexionskoeffizienten  $t_{ikj}$  und  $r_{ikj}$

$$r_{ikx} = \frac{n_i \cos \varphi_i - n_k \cos \varphi_k}{n_i \cos \varphi_i + n_k \cos \varphi_k} \quad r_{iky} = \frac{n_j \cos \varphi_i - n_i \cos \varphi_k}{n_j \cos \varphi_i + n_i \cos \varphi_j} \quad (32)$$

$$t_{ikx} = \frac{2n_i \cos \varphi_i}{n_i \cos \varphi_i + n_k \cos \varphi_k} \quad t_{iky} = \frac{2n_i \cos \varphi_i}{n_k \cos \varphi_i + n_i \cos \varphi_j} \quad (33)$$



sind. Die *Schichtmatrizen*  $\hat{L}_k$  sind gegeben als

$$\hat{L}_k = \begin{pmatrix} e^{i\beta_k} & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_k} \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Die Phasenverschiebung berechnet sich jetzt als

$$\beta_k = \frac{2\pi d_k n_k}{\lambda} \cos \varphi_k. \quad (35)$$

Die Reflexionskoeffizienten ergeben sich schließlich als Quotienten aus Elementen der Matrix  $\hat{S}_j$  der Form

$$R_j = \frac{S_{21j}}{S_{11j}} \quad j = x, y. \quad (36)$$

Die explizite Lösung für das in Abb. 5 beschriebene Zweischichtsystem lautet:

$$R_j = \frac{\left( r_{01j} + r_{12j} e^{-i2\beta_1} \right) + \left( r_{01j} + r_{12j} e^{-i2\beta_1} \right) r_{23j} e^{-i2\beta_2}}{\left( 1 + r_{01j} r_{12j} e^{-i2\beta_1} \right) + \left( r_{12j} + r_{01j} e^{-i2\beta_1} \right) r_{23j} e^{-i2\beta_2}} \quad (37)$$

Sind Schichtdicke  $d_2$  und Brechungsindex  $n_2$  der Oxidschicht, sowie der Brechungsindex  $n_3$  des Substrats bekannt, können nach dem oben beschriebenen Verfahren Brechungsindex  $n_1$  und Schichtdicke  $d_1$  der Probe aus den ellipsometrischen Winkeln bestimmt werden.

## 2 Versuch: Ellipsometrie an Polyelektrolytmultischichten

### 2.1 Polyelektrolytmultischichten

Wird ein Substrat, das eine Oberflächenladung trägt, wie zum Beispiel Glas oder Glimmer in eine Lösung eines Polymers mit geladenen Seitenketten (Polyelektrolyt, PE) getaucht, so lagern sich, wenn die Seitenketten entgegengesetzt zur Oberfläche geladen sind, die Ketten an die Oberfläche an. Dabei wird die Oberflächenladung umgekehrt. Durch Tauchen in eine Lösung eines entgegengesetzt geladenen Polyelektrolyten wird eine neue Schicht angelagert, die Oberflächenladung kehrt sich erneut um. Durch dieses Verfahren lassen sich sogenannte Polyelektrolytmultischichten (PEM) mit über 100 Schichten herstellen. Da es sich hierbei um sowohl stabile als auch äußerst dünne Filme handelt, stellen diese ein interessantes Forschungsobjekt dar. Die Filmdickenzunahme in Abhängigkeit der Schichtanzahl wurde bei gängigen organischen PE als linear beschrieben. Auch nichtlineare, z. B. exponentielle Zunahme wird, vor allem bei Biopolymeren, festgestellt. In ersterem Fall kann oft die Zunahme mit etwa einem Nanometer je Schicht angenähert werden.

### 2.2 Ellipsometrische Messungen

Die Messungen werden an einem *Nullellipsometer* „Multiskop“ der Firma Optrel vorgenommen. Beim Auflegen der Proben auf den Probenstisch ist darauf zu achten, daß die polierte

(glänzende) Seite oben ist und nicht berührt wird. **Achtung:** Es wird ein Laser der Klasse 3B verwendet. Laser dieser Klasse sind gefährlich für das Auge. Während der Probenjustierung ist eine geeignete Schutzbrille (blaue Laserschutzbrille) zu tragen! Der Schieber darf nur im Bei-sein eines Assistenten geöffnet sein.

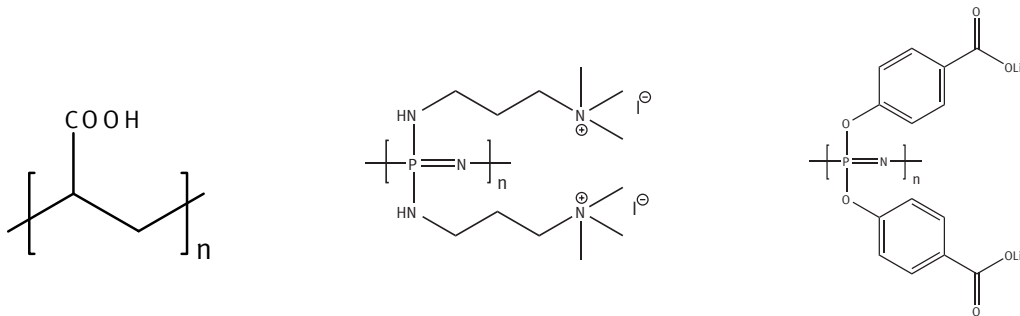
Die Messung wird an einem Rechner durch das Programm „Multi“ gesteuert. Dabei kann der Einfallswinkel eingestellt werden, anschließend stellt das Gerät nach Betätigen der Schaltfläche „Find Nullsetting“ automatisch Polarisator und Analysator so ein, daß die auf den Detektor treffende Intensität minimal wird. Durch Betätigen der Schaltfläche „Measure“ können die genauen Winkel erfaßt werden. Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit (Reproduzierbarkeit) der Messungen ist es sinnvoll, bei verschiedenen Einfallswinkeln  $\varphi$  und an verschiedenen Stellen der Probe zu messen.

Die Auswertung der so erhaltenen ellipsometrischen Winkel erfolgt mit dem Programm „Elli“. Wichtig ist hierbei, darauf zu achten, daß ein sinnvoller Erwartungsbereich für die Schichtdicke angegeben wird.

## 2.3 Aufgabe

In diesem Versuch sollen zunächst PEM aus Polyphosphazenen hinsichtlich der Film dickenzunahme untersucht werden, die durch Beschichtung auf definiert oxidierten ( $d_{\text{Oxid}} = 285,60 \text{ nm}$ ) Siliziumwafern gebildet wurde: Probe 22a. Es wurden Stufen mit 30, 60 und 90 Schichten präpariert. Kann eine Aussage über die Art des Schichtwachstum gemacht werden?

Eine weitere Reihe von PEM wurde aus einem kationischen Polyphosphazen und Polyacrylsäure



**Abbildung 6:** Polymere: Polyacrylsäure (PAA, links), Polyphosphazene

(PAA) hergestellt. Dabei wurde der pH-Wert der PAA-Lösung wie folgt eingestellt: 3,7 (Probe 7c;  $d_{\text{Oxid}} = 282,08 \text{ nm}$ ); 4,46 (11c;  $d_{\text{Oxid}} = 286,75 \text{ nm}$ ); 5,43 (11b;  $d_{\text{Oxid}} = 289,36 \text{ nm}$ ); 6,7 (11a;  $d_{\text{Oxid}} = 288,96 \text{ nm}$ ). Da für größere Einzelschichtanzahlen eine mehr oder weniger ausgeprägte Trübung auftritt, die die ellipsometrische Messung durch Streuung erschwert, soll nur die oberste Stufe ausgewertet werden. Die Einzelschichtanzahl beträgt hier 16. Wie sind die Beobachtungen zu erklären?

## Literatur

- [1] R. M. AZZAM und N. M. BASHARA: Ellipsometry and Polarized Light, Amsterdam (1979)
- [2] *Versuchsanleitung* der Universität Potsdam, <http://www.uni-potsdam.de/u/physik/fprakti/ANLEIF9.pdf> (enthält Druckfehler in mathematischen Formeln)