

L'ELLIPSOMETRIE

L'ellipsométrie est une technique optique d'analyse de surface basée sur la mesure du changement de l'état de polarisation de la lumière lors de sa réflexion sur la surface d'un matériau.

Le terme « ellipsométrie » traduit le fait qu'une lumière monochromatique polarisée rectilignement se retrouve généralement polarisée elliptiquement après réflexion sur un matériau homogène, isotrope et absorbant ; ainsi l'ellipsométrie consiste à mesurer l'ellipticité de l'onde réfléchie.

Les informations que l'on peut en extraire dépendent largement du type de matériel utilisé. Avec l'ellipsomètre mis à votre disposition (ellipsomètre fonctionnant à une longueur d'onde, avec angle d'incidence fixe) on peut déterminer l'**indice de réfraction** et l'**épaisseur** d'un matériau transparent lorsqu'il est déposé en couche mince sur un substrat dont les indices sont connus.

Un usage courant en microélectronique consiste à mesurer l'indice et l'épaisseur d'une couche de dioxyde de silicium déposée sur un substrat en silicium (indices connus).

1. PRINCIPE DE LA MESURE

L'état de polarisation d'un faisceau lumineux est généralement déterminé par les composantes du vecteur induction électrique \vec{D} (ou du champ électrique \vec{E} dans le cas d'un milieu isotrope) suivant deux axes propres que l'on nomme p (axe de l'intersection du plan d'onde avec le plan incidence) et s (axe du plan d'onde perpendiculaire au plan d'incidence¹). Par rapport à ces axes, soient D_{pi} et D_{si} les composantes de l'induction électrique \vec{D}_i de l'onde incidence (indice i), D_{pr} et D_{sr} les composantes de l'induction électrique \vec{D}_r de l'onde réfléchie (indice r).

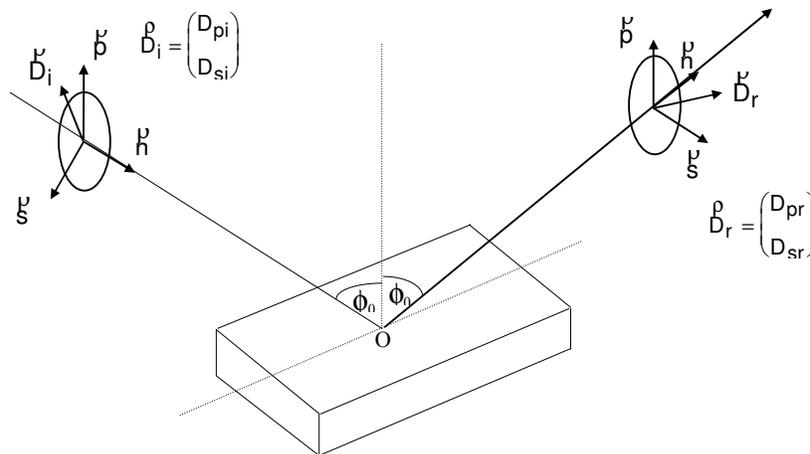


Figure 1 : Représentation de l'induction électrique dans une réflexion par une surface plane.

¹ s est l'initiale du mot allemand « senkrecht » qui signifie perpendiculaire

Dans le cas d'une réflexion par un dioptre plan (Fig.1), les composantes p et s sont totalement découplées et elles ont des comportements différents. Ainsi, à l'interface (point d'incidence O, origine des axes) et au temps $t = 0$, on peut écrire en notation complexe :

$$\begin{cases} D_{pr} = r_p D_{pi} \\ D_{sr} = r_s D_{si} \end{cases}$$

La modification de l'état de polarisation après réflexion par une surface plane peut donc être traduite par les deux coefficients de réflexion complexes r_p et r_s tels que :

$$\begin{cases} r_p = |r_p| \exp(j\delta_p) \\ r_s = |r_s| \exp(j\delta_s) \end{cases}$$

où :

$$|r_p| = \left| \frac{E_{pr}}{E_{pi}} \right| \text{ et } |r_s| = \left| \frac{E_{sr}}{E_{si}} \right| \text{ sont les modules des coefficients } r_p \text{ et } r_s$$

$\delta_p = \delta_{pr} - \delta_{pi}$ et $\delta_s = \delta_{sr} - \delta_{si}$ représentent les déphasages, dus à la réflexion, des composantes p et s.

En pratique, l'ellipsométrie mesure le rapport ρ (complexe) de ces deux coefficients, à savoir :

$$\boxed{\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{|r_p|}{|r_s|} \exp[j(\delta_p - \delta_s)] = \tan \psi \cdot \exp(j\Delta)} \quad (1)$$

où :

- $\tan \psi = \left| \frac{r_p}{r_s} \right|$ représente le rapport des modules des coefficients de réflexion ($0 < \psi < 90^\circ$)
- $\Delta = \delta_p - \delta_s$ représente le déphasage introduit par la réflexion ($0 < \Delta < 360^\circ$).

L'équation (1) est l'équation de base de l'ellipsométrie. Les angles ψ et Δ sont appelés **angles ellipsométriques** : ce sont les deux grandeurs accessibles par la mesure.

2. MESURE DES ANGLES ELLIPSOMETRIQUES

La mesure des angles ellipsométriques est effectuée avec un ellipsomètre « Ellisel (Jobin-Yvon) » à modulation de phase. Cet appareil est mono-longueur d'onde (632,8nm) et à angle d'incidence fixe (70°).

2.1. Principe de fonctionnement de l'ellipsomètre « Ellisel »

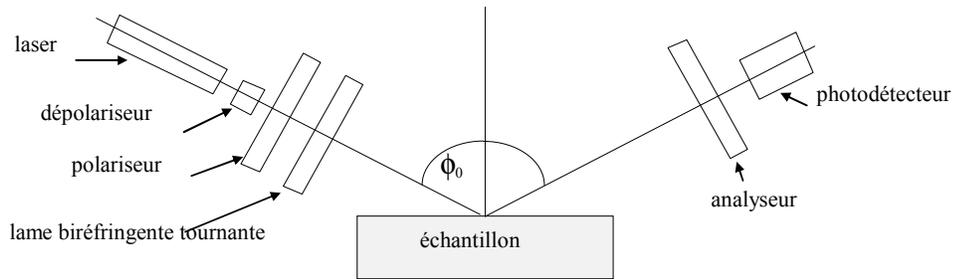


Figure 2 : Schéma de principe de l'ellipsomètre

La lumière émise par un laser He-Ne à la longueur d'onde de 632,8 nm traverse successivement trois éléments (Fig.2) avant de frapper la surface de l'échantillon sous une incidence ϕ_0 :

- un **dépolariseur** (plus précisément un polariseur circulaire)
- un **polariseur** « rectiligne » dont la direction de polarisation fait un angle fixe θ par rapport au plan d'incidence (vertical) de l'échantillon
- une **lame biréfringente** quart-d'onde tournant à la vitesse de 6000 tr/min (fréquence 100 Hz) ; il s'agit d'une lame en quartz, taillée parallèlement à l'axe optique, d'une épaisseur multiple de $\lambda/4$. Cette lame introduit **une modulation de polarisation** en fonction du temps: à sa sortie la lumière passe successivement par une polarisation **linéaire**, **elliptique** **circulaire** en fonction de l'orientation des axes rapide et lent de la lame quart-d'onde par rapport à l'orientation fixe du polariseur.

Après réflexion, la lumière traverse un **analyseur** dont la direction de polarisation fait un angle fixe α par rapport au plan d'incidence ; elle est ensuite recueillie par un **photodétecteur** (photodiode).

3. MESURES DE L'INDICE ET DE L'ÉPAISSEUR

Le logiciel ESEL est un logiciel adapté aux mesures optiques sur des échantillons de Si oxydé. Connaissant les indices de Si, il permet d'obtenir l'**indice** et l'**épaisseur** de la couche de SiO_2 :

- Soit directement lorsque cette épaisseur $d < D$ (~280 nm pour SiO_2)
- Soit indirectement lorsque cette épaisseur $d > D$; dans ce cas, on mesure d_0 alors que l'épaisseur réelle est :

$$d = d_0 + nD$$

où n est un entier qui doit être déterminé par une autre méthode (ex : mesure de l'épaisseur avec un profilomètre)

La période **D** ne dépend que de l'indice **η** de la couche de SiO₂ et de l'angle d'incidence **φ₀** :

$$D = \lambda/2(\sqrt{\eta^2 - \sin^2 \phi_0})$$

C'est l'épaisseur pour laquelle la lumière qui a traversé la couche de SiO₂ présente un retard de phase de $\lambda/2$ par rapport à celle qui est réfléchiée à sa surface.

Pour mesurer l'indice **η** et l'épaisseur **d₀** de couches de SiO₂ sur Si :

Activer la fonction « *Thickness and Index N* » dans le menu « *Development* »

Dans le tableau qui apparaît à l'écran, il faut afficher :

- Pour «ambient layer», **η** =1 et **κ** =0 (air)
- Pour «first layer», les valeurs attendues (au moins un ordre de grandeur, si on le connaît) pour **η** et **thi** (épaisseur) sachant que **κ** = 0 pour un matériau transparent (SiO₂).
- Pour «second layer», absente ici (il n'existe qu'une seule couche sur le substrat), une valeur nulle pour l'épaisseur, mais une valeur non nulle (quelconque) pour l'indice de cette couche virtuelle.
- Pour «substrate», **η** = 3.866 et **κ** =0.028 (Si).

NB : Appuyer sur la touche « Echap » pour lancer la mesure ou l'arrêter.

En déduire l'épaisseur réelle des couches sachant que **n = 0** pour l'**oxyde mince** et **n=2** pour l'**oxyde épais**.