
Ellipsométrie — Principes

Ellipsometry — Principles

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 23131:2021

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/575d6311-5cd0-4c64-8cb2-690d09c4b98c/iso-23131-2021>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 23131:2021

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/575d6311-5cd0-4c64-8cb2-690d09c4b98c/iso-23131-2021>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2021

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions, symboles et termes abrégés	1
3.1 Termes et définitions	1
3.2 Symboles et termes abrégés	1
4 Conditions expérimentales limites concernant l'échantillon	2
5 Conditions expérimentales limites concernant le mesurage	3
6 Conditions limites de la simulation corrélées au modèle	4
7 Modèles de base	4
7.1 Généralités	4
7.2 Matériau monolithe (cas d'application no 1)	5
7.3 Couche unique transparente (cas d'application no 2)	5
7.4 Couche unique semi-transparente (cas d'application no 3)	5
7.5 Couches multiples et couches périodiques (cas d'application no 4)	5
7.6 Matériaux réels (cas d'application no 5)	5
8 Données brutes	5
9 Vérification du réglage correct du dispositif	6
9.1 Mesurage en ligne droite	6
9.2 Simple mesurage des angles	6
9.2.1 Mesurage sur un échantillon connu, par exemple SiO ₂ /Si, avec régression de l'angle d'incidence	6
9.2.2 Mesurage de l'angle de Brewster de l'eau, d'un solvant ou d'un verre technique	8
10 Vérification du bon étalonnage du dispositif	9
11 Rapport d'essai	9
Annexe A (informative) Principes mathématique et physique de l'ellipsométrie	10
Bibliographie	15

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 107, *Revêtements métalliques et autres revêtements inorganiques*.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Introduction

La méthode de mesure de l'ellipsométrie est une technique de réflexion sensible à la phase utilisant de la lumière polarisée dans le champ optique lointain. Au fil du temps, l'ellipsométrie s'est imposée comme une méthode de mesure non exclusive au domaine de la technologie des semi-conducteurs, en particulier dans la production intégrée, d'abord comme une méthode à une seule longueur d'onde, puis comme une méthode à multiples longueurs d'onde et plus tard comme une méthode de mesure spectroscopique.

Grâce à l'ellipsométrie, les constantes optiques ou diélectriques de tout matériau ainsi que les épaisseurs de couche des couches ou systèmes de couches au moins semi-transparents peuvent être déterminées. L'ellipsométrie est une méthode de mesure indirecte, dont l'analyse repose sur l'optimisation d'un modèle. Les grandeurs mesurées, qui diffèrent selon le principe opératoire, sont convertis en facteurs ellipsométriques Ψ (Psi, information d'amplitude) et Δ (Delta, information de phase), sur la base desquels les valeurs physiques cibles étudiées (constantes optiques ou diélectriques, épaisseurs de couche) seront ensuite déterminées au moyen d'une régression paramétrée.

L'ellipsométrie offre une haute précision en ce qui concerne les grandeurs de transfert ellipsométriques Ψ et Δ , qui peut être équivalente à une sensibilité d'épaisseur de couche de 0,1 nm pour les systèmes substrat/couche parfaits. La méthode de mesure peut donc vérifier les écarts même les plus minimes des caractéristiques de surface. Cela est étroitement lié à l'homogénéité et à l'isotropie de la surface du matériau. Afin d'obtenir une haute précision, il est nécessaire de réaliser les mesurages exactement au niveau du même point pour les matériaux non homogènes. Il en va de même pour l'orientation du plan d'incidence par rapport à la surface du matériau pour les matériaux anisotropes.

La précision absolue, par exemple de valeurs d'épaisseur de couche, dépend grandement de la qualité du modèle choisi pour décrire la surface du matériau. Pour les systèmes substrat/couche parfaits, tels que SiO₂ (couche transparente parfaite) sur une tranche de Si (surface de substrat quasiment atomiquement lisse ayant des propriétés de matériau homogène et isotrope), la précision de l'épaisseur de couche peut effectivement atteindre les valeurs absolues, étant donné que le modèle décrit parfaitement la réalité du système substrat/couche. Pour les surfaces ou couches non homogènes, anisotropes, contaminées, à multiples composés, endommagées, imparfaites ou rugueuses, la précision de la détermination de l'épaisseur de couche peut être nettement moindre et dépend généralement de la qualité du modèle choisi.

Malgré ces restrictions, l'ellipsométrie est une méthode très efficace, qui soit permet de caractériser les matériaux (sans modélisation), soit permet une détermination à partir d'un modèle des constantes optiques et diélectriques (à 0,001 près) ou des épaisseurs de couche (à 0,1 nm) dans une vaste plage d'épaisseur de couche entre environ 0,1 nm et environ 10 μm (dans des cas particuliers, au-delà de 100 μm).

Ellipsométrie — Principes

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode de détermination des constantes optiques et diélectriques dans la gamme spectrale UV-VIS-PIR ainsi que des épaisseurs de couche dans le domaine du contrôle de production sur ligne, de l'assurance qualité et de la mise au point de matériau par des laboratoires d'essai accrédités.

Il s'applique aux systèmes de mesure indépendants. La présentation de l'incertitude des résultats est conforme à l'ISO/IEC Guide 98-3.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure — Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions, symboles et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

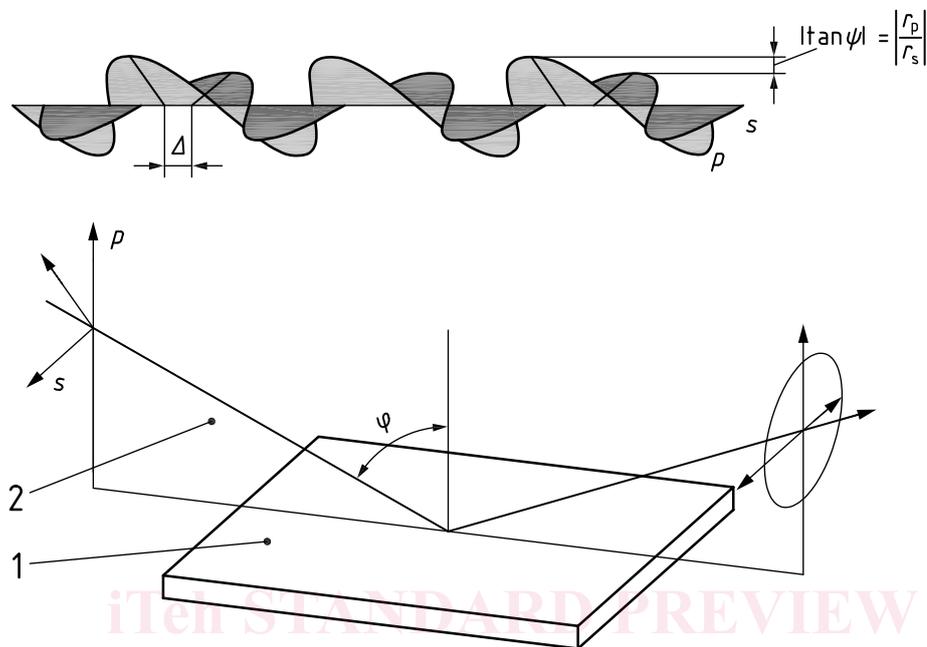
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>

3.2 Symboles et termes abrégés

Symbole ou terme abrégé	Description
P	polariseur
C	compensateur
S	échantillon
A	analyseur
POI	plan d'incidence de la lumière, formé par la normale à la surface et la direction de propagation de la lumière incidente
POP	plan de polarisation de la lumière, formé par le vecteur de champ électrique et la direction de propagation de la lumière incidente
Ψ, Δ	grandeurs de transfert ellipsométriques Psi et Delta, qui servent de données brutes à conserver, par exemple conformément à l'ISO/IEC 17025
φ	angle d'incidence entre l'onde lumineuse incidente et l'axe d'incidence
d	épaisseur de couche

4 Conditions expérimentales limites concernant l'échantillon

Les [Figures 1](#) et [2](#) représentent de manière schématique un mesurage ellipsométrique en tant que technique de réflexion sensible à la phase utilisant de la lumière polarisée; tant en ce qui concerne les aspects photo-optiques (voir [Figure 1](#)) qu'en ce qui concerne les aspects métrologiques (voir [Figure 2](#)).



Légende

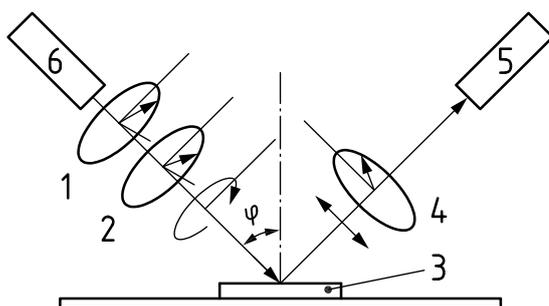
- 1 échantillon
- 2 POI
- φ angle d'incidence

iTECH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 23131:2021

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/575d6311-5cd0-4c64-8cb2-690d09c4b98c/iso-23131-2021>

Figure 1 — Représentation schématique du trajet optique/de l'état de polarisation avant et après réflexion (surface de substrat, axe et angle d'incidence, trajet optique/onde lumineuse, polarisation s et p)



Légende

- 1 polariseur
- 2 compensateur
- 3 échantillon
- 4 analyseur
- 5 détecteur
- 6 source de lumière

Figure 2 — Représentation schématique du montage métrologique (source de lumière, configuration P-C-S-A)

Il convient de fixer préalablement d'un commun accord les conditions expérimentales limites suivantes concernant l'échantillon et, si cela est pertinent, de les documenter dans le rapport d'essai:

- déterminer/spécifier le point de mesure (évaluation de l'homogénéité) et l'orientation de l'échantillon (évaluation de l'isotropie);
- état de la surface: faire une micrographie de la surface si nécessaire;
- topographie de la surface: si nécessaire, mesurer la rugosité de la surface;
- autres propriétés de l'échantillon à prendre en compte ou à corriger:
 - échantillons courbes ou angulaires;
 - influence de la réflexion par la face arrière (pour les échantillons transparents), le cas échéant;
 - surface en l'état ou nettoyée;
 - fixation de l'échantillon.

5 Conditions expérimentales limites concernant le mesurage

Il convient de fixer préalablement d'un commun accord les conditions expérimentales limites suivantes concernant le mesurage et, si cela est pertinent, de les documenter dans le rapport d'essai:

- indication du type d'ellipsomètre utilisé: ellipsomètre d'imagerie ou ellipsomètre de cartographie (manuel ou automatique);
- pour les ellipsomètres d'imagerie, les facteurs suivants sont pertinents: taille résultante du champ de mesure/de la région d'intégration [champ d'illumination (FOI, de l'anglais « field of illumination »): surface de l'échantillon qui est illuminée par la lumière incidente, champ de vision (FOV, « field of view »): surface de l'échantillon dans le FOI à partir de laquelle la lumière est collectée par les coordonnées d'origine du détecteur, région d'intérêt (ROI, « region of interest »): surface de l'échantillon dans le FOV qui est pertinente pour le mesurage];
- pour les ellipsomètres de cartographie, les facteurs suivants sont pertinents: [champ d'illumination (FOI): surface de l'échantillon qui est illuminée par la lumière incidente, champ d'analyse (FOA, « field of analysis »): surface de l'échantillon dans le FOI à partir de laquelle la lumière est collectée par les coordonnées d'origine du détecteur];
- configurations de l'ellipsomètre: [P-S-A, P-C-S-A, P-S-C-A ou P-C-S-C-A];
- principe de l'ellipsomètre [ellipsomètre à analyseur rotatif (RAE, « rotating analyser ellipsometer »), ellipsomètre à polariseur rotatif (RPE, « rotating polarizer ellipsometer »), ellipsomètre à modulation de phase (PME, « phase modulated ellipsometer »), ellipsomètre à compensateur rotatif (RCE, « rotating compensator ellipsometer »), ellipsomètre à annulation (NE, « nulling ellipsometer »), ellipsomètre à pas de balayage (SSE, « step scan ellipsometer »), ellipsomètre spectroscopique référencé (RSE, « referenced spectral ellipsometer »), etc.];
- classe d'ellipsométrie [ellipsométrie à une seule longueur d'onde (SWE, « single-wavelength ellipsometry »), ellipsométrie à multiples longueurs d'onde (MWE, « multiple-wavelength ellipsometry »), ellipsométrie spectroscopique (SE, « spectroscopic ellipsometry »)];
- domaine spectral utilisé et résolution spectrale résultante, qui dépendent notamment de la source de lumière et du spectromètre utilisés;
- angle d'incidence, mesurage selon plusieurs angles pour la vérification du modèle, de préférence/au moins selon deux angles d'incidence sensiblement différents;
- orientation de l'échantillon sur la platine pour échantillon;
- position du FOV ou du FOA sur l'échantillon;

- alignement de l'échantillon par rapport au plan d'incidence (POI) et/ou par rapport au plan de polarisation (POP).

6 Conditions limites de la simulation corrélées au modèle

Les conditions limites suivantes concernant la simulation doivent être fixées préalablement d'un commun accord et, si cela est pertinent, être documentées dans le rapport d'essai:

- définition du modèle ellipsométrique (matériau du substrat, rugosité, architecture des couches, matériaux des couches, épaisseurs de couche initiales et paramètres de régression);
- application de valeurs issues d'une base de données pour les constantes optiques ou diélectriques ou détermination expérimentale distincte de ces constantes pour des paramètres sans régression;
- formules de dispersion appliquées.

L'application d'une procédure de régression itérative (voir [Figure 3](#)) visant à obtenir le plus faible écart moyen de la racine carrée (D_{RMS}) entre les courbes d'évolution mesurées et simulées de Ψ ou Δ conformément à la [Formule \(A.20\)](#) donnera les paramètres de régression voulus, tels que l'épaisseur de couche et l'indice de réfraction.

NOTE Conformément à l'ISO/IEC Guide 98-3, le terme « erreur » n'est plus utilisé; toutefois, dans bon nombre de produits logiciels, le terme d'erreur quadratique moyenne (RMSE, de l'anglais « root mean square error ») peut être rencontré à la place de D_{RMS} .

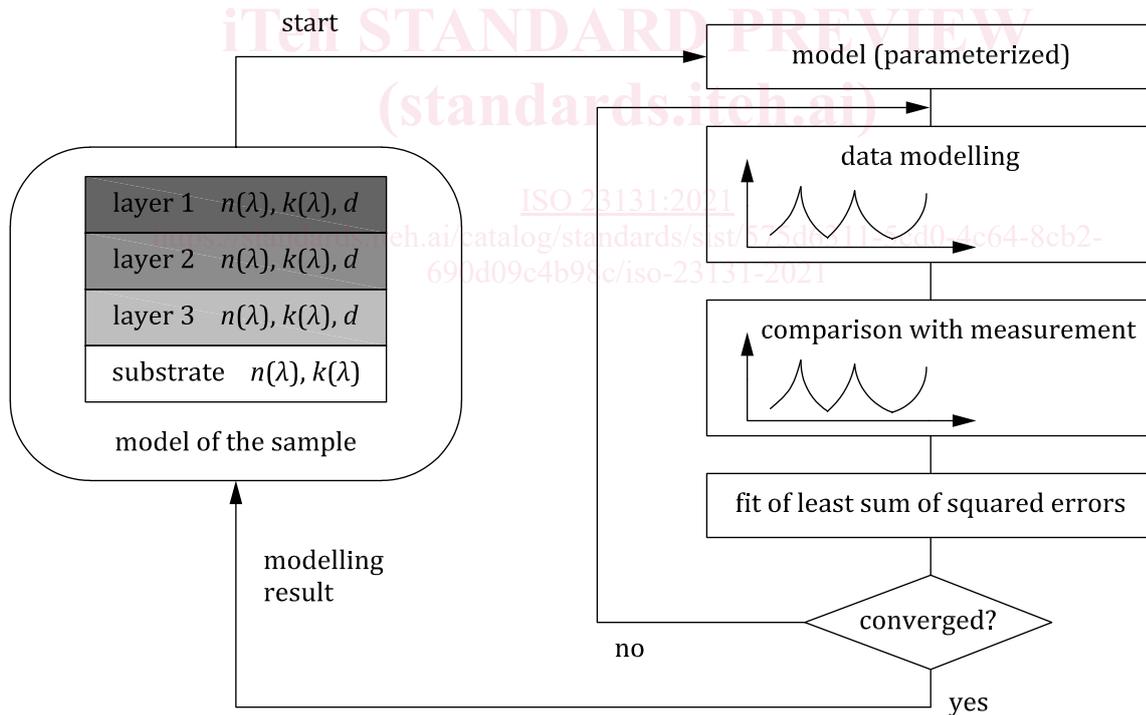


Figure 3 — Représentation schématique de la procédure de régression itérative

7 Modèles de base

7.1 Généralités

Les grandeurs de transfert ellipsométriques Ψ et Δ constituent une carte d'identité spectrale de la surface de l'échantillon et peuvent donc être également utilisées pour l'identification des matériaux. Pour la détermination des constantes/fonctions optiques et diélectriques ainsi que des épaisseurs de

couche, un modèle est obligatoire. À cette fin, les modèles de base conformément aux paragraphes 7.2 à 7.6 sont utilisés.

NOTE De plus amples informations générales sont disponibles dans les Références [1] à [9].

7.2 Matériau monolithe (cas d'application no 1)

Voir DIN 50989-2.

Matériau non revêtu, propre, homogène et isotrope d'épaisseur suffisante, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte des réflexions par la face arrière, même pour des matériaux transparents.

7.3 Couche unique transparente (cas d'application no 2)

Voir DIN 50989-3.

Couche délimitée, pour laquelle l'extinction de lumière peut être négligée.

7.4 Couche unique semi-transparente (cas d'application no 3)

Voir DIN 50989-4.

Couche délimitée, pour laquelle l'extinction de lumière de la couche ne peut pas être négligée.

7.5 Couches multiples et couches périodiques (cas d'application no 4)

Voir DIN 50989-5.

Système de couches composé de multiples couches uniques conformément à 7.3 et/ou 7.4 sous la forme d'empilements de couches ou avec plusieurs répétitions de deux matériaux de couche en alternance.

7.6 Matériaux réels (cas d'application no 5)

Voir DIN 50989-6.

Rugosité, couches à gradient de composition, couches en îlot et couches composites.

8 Données brutes

L'ellipsométrie à annulation est la première méthode de mesure qui a été mise au point dans le domaine de l'ellipsométrie. Les grandeurs de transfert ellipsométriques Ψ et Δ , qui sont encore largement utilisées à l'heure actuelle, doivent être traitées comme des données de mesure directes exclusivement dans le cadre de l'ellipsométrie à annulation. Pour bon nombre de dispositifs (RAE, RCE, RPE, etc.), ces paramètres sont actuellement générés à partir du signal d'intensité modulée à l'aide d'une analyse de Fourier. Toutefois, une autre méthode a été depuis mise au point, laquelle contourne l'analyse de Fourier à partir d'un traitement de signal analogique en calculant à la place directement les valeurs de Ψ et Δ par régression des données de mesure. Ainsi, chaque fois que des erreurs sont analysées, il doit être observé que dans bon nombre des cas, même les grandeurs de transfert ellipsométriques (en données brutes) représentent souvent le résultat d'un processus de régression.

C'est pourquoi l'approche vers un traitement de données brutes est passée des paramètres Ψ et Δ aux grandeurs qui sont plus profitables en métrologie moderne. Des exemples sont le calcul avec des vecteurs de Stokes et le calcul avec des éléments de la matrice de Jones ou de Mueller. Il est actuellement estimé que le calcul avec les seuls éléments N_M , C_M et S_M de la matrice de Mueller [voir Formule (A.23)] est la méthode la plus adaptée pour garantir une analyse stricte de l'incertitude, voir Annexe A.