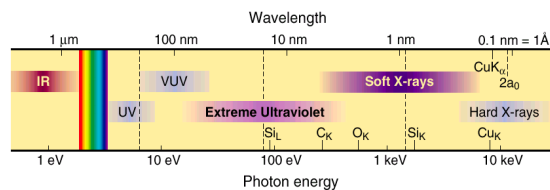


Un Réflectomètre et Ellipsomètre Spectroscopique sur des couches minces dans les domaines VUV de 5 à 100 eV couplé à une source plasma RCE.

Cette réflexion concerne le développement d'une métrologie avancée et innovante, qui adapte la technologie à la réalisation d'une nouvelle métrologie EUV et VXUV. La technique concernée ici est la Réflectométrie et l'Ellipsométrie Spectroscopique. Dans ce domaine spectral on doit utiliser aujourd'hui des moyens lourds (types anneaux de stockage rayonnement, source synchrotron), onéreux et complètement incompatibles avec l'aspect de la recherche en laboratoire et des contrôles de processus industriel. L'Ellipsométrie était alors réservée seulement à des groupes de recherche disposant d'équipements sur des lignes de rayonnement synchrotron et pouvant l'assumer financièrement. Le développement des sources actuelles permet de définir un concept de métrologie intégré de façon entièrement nouvelle car d'autres sources existent qui diffèrent suivant leur mode opératoire.

Hormis le rayonnement synchrotron, les technologies les plus courantes pour la production de rayonnement XUV dans les laboratoires de recherche sont : les générations d'harmonique laser, les décharges électriques, les plasmas produits par laser. A notre connaissance, les techniques de génération d'harmonique produisent des flux relativement faibles, mais bénéficient de la directivité des faisceaux lasers. Les décharges électriques se déclinent en de nombreux types (décharge capillaire (Capella, AiXUV), pseudospark, Z-pinch, plasma focus...), elles présentent souvent les avantages de la simplicité d'utilisation et de la rentabilité énergétique et du faible coût d'intégration sur un système complet. Enfin, les plasmas produits par laser peuvent engendrer des sources cohérentes ou non. Les flux de photons peuvent être comparables aux décharges électriques mais à un coût beaucoup plus élevé. Ces technologies ont fortement bénéficié ces dernières années de la dynamique de développement liée à la lithographie EUV à 13.5 nm. Ces sources offrent un nombre d'avantages considérable en premier lieu lié à leur compacité. Une de leurs applications est aujourd'hui de permettre la mise en œuvre d'un ellipsomètre spectroscopique XUV fonctionnant entre 5 et 100 eV. Le présent rapport décrit l'intérêt d'associer le choix d'une source de type plasma RCE avec un ellipsomètre spectroscopique.

La réduction de l'épaisseur des couches et l'apparition de nouveaux matériaux rend délicat leur caractérisation par ellipsométrie classique dans le visible ou proche Ultraviolet (UV). Il devient indispensable d'étendre par un développement de ces méthodes optiques à l'UV lointain, domaine dit VUV et EUV allant de 5 à 100 eV comme on peut le voir sur le diagramme ci-dessous.



Un tel instrument serait un outil de référence aussi bien pour des matériaux de base de la microélectronique que pour la métrologie des futurs nano-matériaux et aussi de la lithographie extrême dans l'ultraviolet 13 nanomètres, avec la potentialité de mesurer des épaisseurs de métaux en couches minces. Dans le domaine XUV, une telle métrologie est pratiquement inexistante dans l'industrie à ce jour dans le monde. Cet appareil se veut précurseur et doit conserver la finalité de fournir un démonstrateur à un équipementier pour le commercialiser.

Il s'agit bien de la réalisation d'un prototype d'instrument : un réflectomètre - ellipsomètre spectroscopique adapté développé dans un concept de métrologie intégré et couvrant une gamme d'énergie de photons jusque là non conventionnelle par rapport à l'existant mondial. Dans un très proche avenir les besoins de métrologie en ellipsométrie devront être étendus à l'UV lointain. En effet, dans les Circuits Intégrés modernes, on assiste à la diminution de l'épaisseur de grille sous les 2 nm, et à l'apparition de nouveaux matériaux de haute permittivité dits " high k ". De plus les transitions inter bandes de la plupart de ces nouveaux diélectriques sont situées dans l'UV lointain. Les résultats des mesures utilisant des sources plasmas Laser avec des cibles tournantes en Sm, de l'équipe de R. H.

French aux Etats Unis www.lrsm.upenn.edu/~frenchrh révèlent bien le nombre élevé de transitions jusqu'à environ 40 eV observables dans la plus part des diélectriques utilisés en microélectronique et observée à ce jour seulement à partir de mesure de réflectivité. D'autres études ont été systématiquement poussées dans ce domaine par le groupe de M. Cardona en Allemagne. De tels études mobilisent actuellement beaucoup de chercheurs dans les équipes autour des sources synchrotrons de Berkeley aux USA. (Gullikson, Regina Soufli et D.T. Attwood.)

Un ellipsomètre VUV " en ligne ", notamment avec une source VUV entièrement nouvelle, continue. Le caractère innovant de cet ellipsomètre tient au fait qu'il n'existe actuellement pas sur le marché de sources compactes EUV et RXM finalisées pour cette technique de métrologie. Il permet donc d'ouvrir un champ d'application important pour la gamme de rayonnement mentionné. Ensuite, il doterait les salles blanches utilisant diverses techniques d'analyse citées, de capacités de diagnostic pour les MNT jusque là inaccessible en métrologie conventionnelle. Enfin, l'intérêt scientifique et technique réside en premier lieu dans la réalisation même de cet appareil et d'une possibilité d'investigation de transitions inter bandes jusqu'à présent tant en recherche amont qu'au niveau du contrôle industriel en ligne. Dans un très proche avenir les besoins de métrologie en ellipsométrie devront être étendus à l'UV lointain. En effet, dans les Circuits Intégrés modernes, on assiste à la diminution de l'épaisseur de grille sous les 2 nm, et à l'apparition de nouveaux matériaux de haute permittivité dits " high k ". De plus les transitions inter bandes de la plupart de ces nouveaux diélectriques sont situées dans l'UV lointain. La température des procédés, et les paramètres de croissance, peuvent modifier le gap optique, ils doivent être parfaitement maîtrisés. Un contrôle de la qualité " en ligne " des couches est indispensable. Cet appareil : la réalisation d'un ellipsomètre VUV " en ligne ", lève un verrou essentiel avec une source VUV (plasma RCE) potentiellement nouvelle, soit continue soit pulsée.

L'apport de l'ellipsométrie autour de 100 eV :

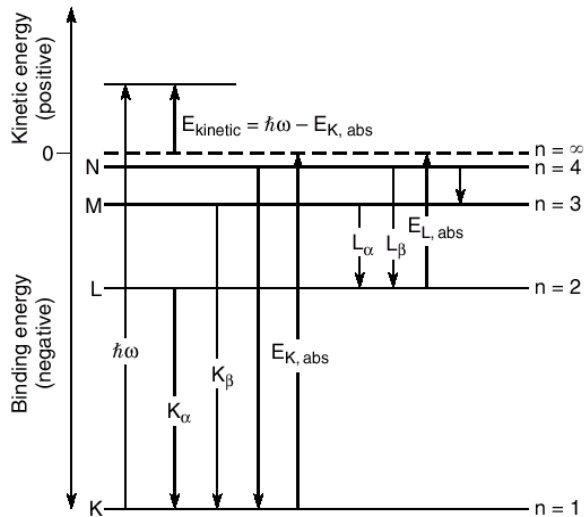
En parallèle un ellipsomètre spectroscopique adapté dans un concept de métrologie intégré sous vide doit couvrir une gamme d'énergie de photons jusque là non conventionnelle par rapport à l'existant mondial (En VUV et EUV le savoir-faire est limité aujourd'hui uniquement à des mesures de réflectivité rasantes sur des installations de type rayonnement synchrotron et des monochromateurs de plusieurs mètres de focale. L'ambition ici est de couvrir un domaine spectral allant du proche ultraviolet. (5eV) jusqu'à des énergies de Photons de l'ordre de 120eV(10nm) qui est la limite du rayonnement X mou. Dans ce choix un premier domaine 5-30 électrons volt couvre l'ensemble des transitions inter bandes de valence des diélectriques et nouveaux matériaux utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs. On peut très bien concevoir un appareil qui donne suivant le choix de l'opérateur des mesures entre 5 et 80 eV par exemple et une seconde option plus spécifique autour de 97eV pour observer l'absorption L_2L_3 du silicium.

Si nous considérons au-delà de cette limite, à hautes énergies des photons (30-100eV ou 12.4nm), la plus part des matériaux ont des indices voisins de l'unité, Les indices optiques sont décrits par $n=1-\delta+i\beta$. Les atomes sont considérés comme des dipôles dans un milieu transparent ($n-1$). Le moment dipolaire total est proportionnel à un facteur de diffusion f^0 . On a : $n=1 - r_e/2\pi \lambda^2 N_a f^0$ où $f^0=f(\omega)=f_1^0(\omega)-i f_2^0(\omega)$ est un facteur de diffusion moyen entre ces atomes Le terme $f_2^0(\omega)$ a été déterminé expérimentalement par des mesures en transmission sur des films auto supportés (free standing films). Les parties réelles et imaginaires f_1 et f_2 sont reliées aux constantes optiques δ et β par :

$$\delta \sim r_e/2\pi \lambda^2 N_a f_1^0$$

$$\beta \sim r_e/2\pi \lambda^2 N_a f_2^0$$

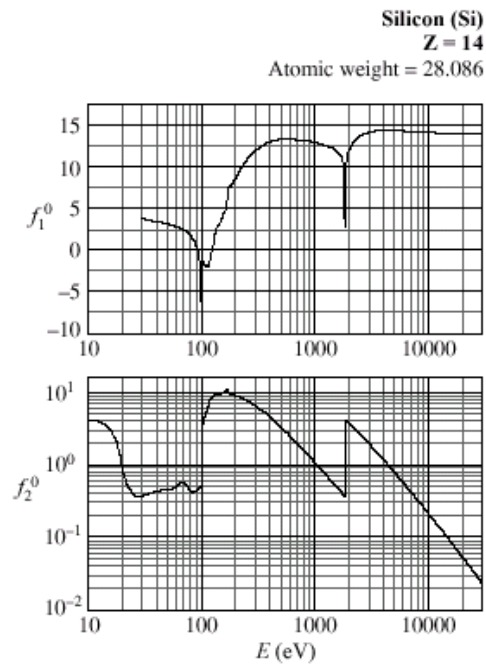
L'autre paramètre f_1 est à présent recalculé avec les relations de Kramer's Krönig à partir des mesures de réflectivité. L'ellipsométrie spectroscopique permettrait de les déterminer entièrement. L'ensemble des éléments figure ainsi dans les tables de Henke [], comme dans le cas du silicium reporté ci-dessous avec la liste des positions des bords d'absorption dans le cas du silicium. (fig. x) Ces dernières correspondent au niveau d'énergies, bords d'absorptions et les raies d'émissions caractéristiques de l'ensemble du cortège électronique lié à l'atome comme dans le schéma ci-dessous.



Dans notre cas on note les deux transitions L2 et L3 pour le silicium à 99.8 et 99.2 eV.

Edge Energies:	K	1838.9 eV	L ₁	149.7 eV
			L ₂	99.8 eV
			L ₃	99.2 eV

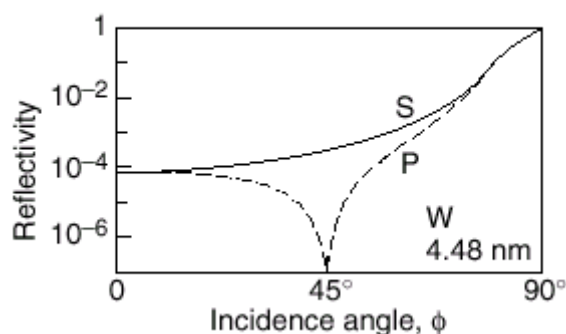
Fig3 Les tables de Henke pour le Si



Un instrument capable d'observer ces transitions devient un outil de référence pour la métrologie. A ce jour, avec l'XPS (binding energies), seul les mesures de réflectivité en incidence rasante (88 degrés) mettent en évidence de façon directe cette transition mais sous la forme d'un courant de photo émission induite. Pour l'ellipsométrie on devrait se trouver dans de meilleures conditions en considérant l'angle de Brewster Φ_B (réflexion totale) pour lequel on a :

$$\phi_B \simeq \frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}$$

qui correspond à un minimum de Rp/Rs comme dans le cas de la figure ci-dessous :



Dans le cas de la réflectivité, avec une source synchrotron, les mesures s'effectuent en incidence rasante (0.6 degrés). Citons le groupe Germano-russe de DESY(Berlin) et celle du LURE à Orsay, avec les travaux de E.Filatova. Pour cette gamme d'énergie M. Cardona définit sur son ellipsometre de Bessy une voie à 45 degrés d'incidence.

L'XPS en analyse de surface mesure l'énergie des transitions de liaison (binding <0) et cinétique (kinetic >0) des électrons retro diffusés par l'échantillon et ensuite collecté par l'analyseur. Dans ce cas il intervient deux paramètres pour l'XPS, la profondeur d'échappement (en terme exponentiel décroissant et possibilité de profils (angulaires) et la section efficace de photo émission du matériaux considéré où intervient la fonction diélectrique $\epsilon(E)$. Cette méthode donne donc une information sur les niveau liant (binding energy) et anti-liant (ou kinetic energy positive). La technique par ellipsométrie, associé à l'absorption des photons est elle une mesure directe de la fonction diélectrique du matériau. En incidence rasante (88degrés et au de là), sur la figure suivante, est reporté la simulation de la réflectivité théorique d'un film de 120nm de SiO₂ sur du Si. On note les points singuliers correspondant aux transitions Si L₂ et L₃ et une parfaite correspondance avec les résultats expérimentaux. de E. Filatova.(LURE) On distingue également un effet qui pourrait être à courte distance étroitement lié à l'environnement de l'atome de Si. Il est noté en effet que les calculs de Henke ne prévoient pas une telle structure mais un agrégat d'atomes sans interaction mutuelles dipolaires. La simulation reportée ci-dessous est effectuée à partir des données du Handbook de Palik. Elle montre l'effet de l'angle pour une incidence rasante entre 76 et 88 degrés (14 à 2 degrés).

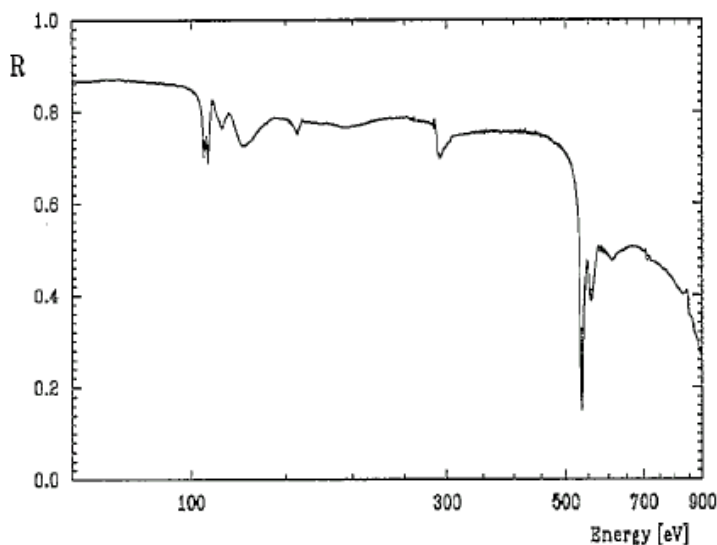


Figure 2. Reflectivity R versus photon energy measured at 88° angle of incidence.

fig.1 les mesures de réflectivité R(E) par E.Filatova à 88 degrés sur 120nmSiO2/Si

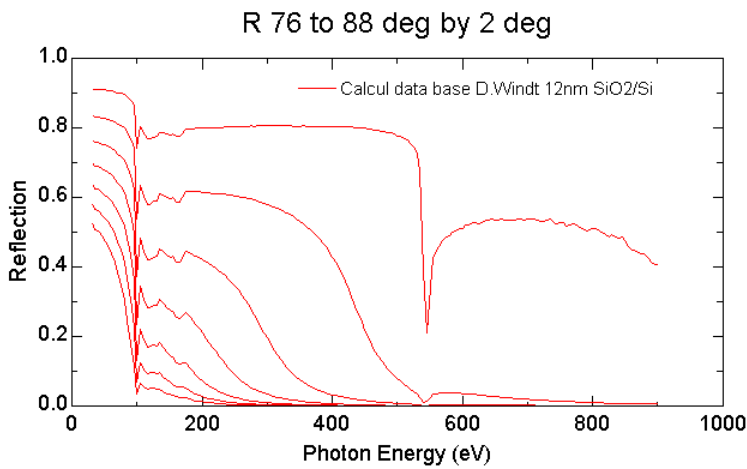


fig 2 effet de l'angle d'incidence rasante (indices Palik) entre 14 et 2 degrés

Il existe une différence entre la réponse d'un substrat nu (Si) et quelques angstroms de SiO2. Cet effet se voit sur la figure 3 où on a choisit un angle pratiquement égal à l'angle de Brewster (45) puisque l'on a ici : $\theta_b = 1 - \beta$

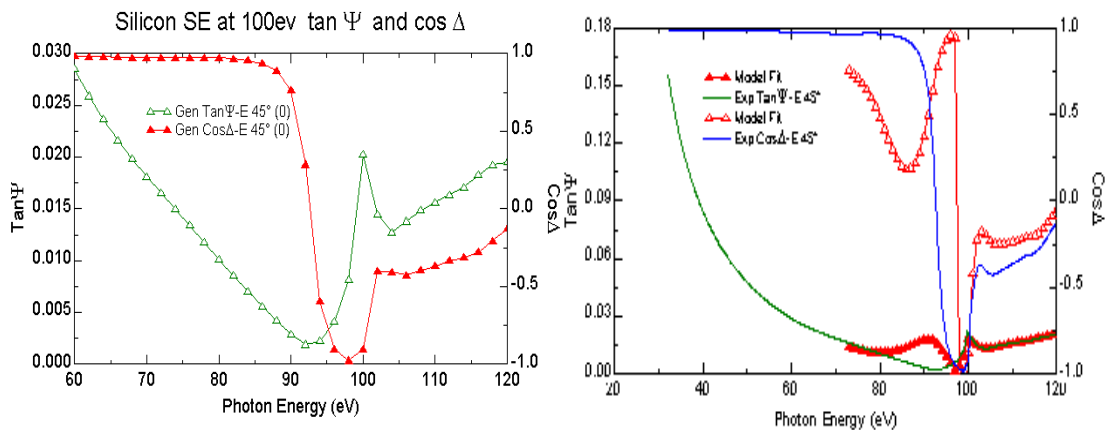


fig 3 a Mesure sur un substrat nu (traits continus) $\Phi=45$ degrés et 4b même calculs avec 0.1 nm d'oxyde

On peut également procéder de façon subtractive de façon similaire par rapport à l'XPS en représentant la différence $\tan\Psi_{\text{oxyde}} - \tan\Psi_{\text{substrat}}$ et la relation équivalente pour Δ on obtient alors le résultat suivant dans le cas d'une épaisseur de 0.1 nm. Sur la figure 4 :

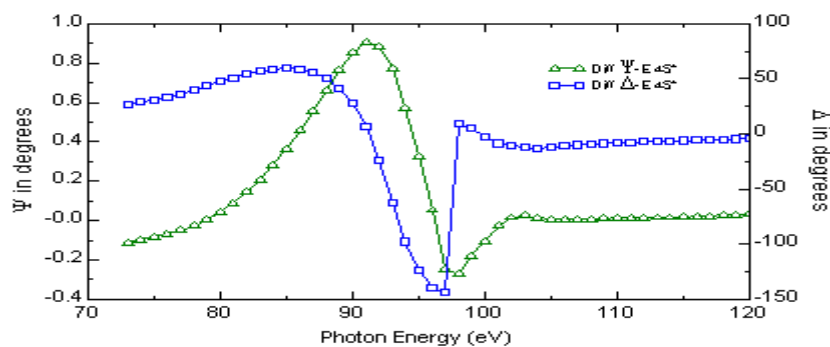


fig. différences sur Ψ et Δ après croissance de 0.1nm d'oxyde.

Quelques commentaires

Le caractère innovant tient au fait qu'il n'existe actuellement pas sur le marché de sources compactes EUV et RXM d'intensité comparable et aussi finalisées pour ces deux techniques de métrologie que celle par plasma RCE. Cet appareil permet donc d'ouvrir un champ d'application important. L'intérêt scientifique et technique de l'ellipsométrie VUV apparaît possible grâce à l'utilisation d'une source RCE. Deuxièmement, il tient à la valeur ajoutée non négligeable que cet ellipsomètre apporte en caractérisation d'extrême surface parallèle à ce qui voit le jour à l'heure actuelle, en conférant un atout majeur dans leur application en connaissance de surface et de matériaux tant en recherche amont qu'au niveau du contrôle industriel en ligne.

Les besoins actuels de la métrologie sont orientés vers le domaine des rayonnements ultraviolet. Les raisons de cet intérêt tiennent aux développements de la technologie des circuits intégrés avec les différents points clés suivants : La diminution des dimensions impliquent des oxydes de grille ou des diélectriques hautes permittivités (high k) de l'ordre de quelques nanomètres. Les conditions de température d'un process et des paramètres de croissance d'un matériau peuvent modifier aussi son gap optique. Il existe un besoin de contrôle de qualité en production « on line ». La plus part des diélectriques utilisés possèdent des transitions inter bandes dans l'ultraviolet et n'ont ainsi pratiquement pas été considérés à ce jour. Citons aussi le domaine la porosité des matériaux low k, type SIOC où les atomes de carbone sont disséminés dans un réseau vitreux. Le besoin de contrôler le développement des matériaux utilisés dans les lithographie avancée 127nm et 13nm. La détection des défauts créés par irradiation dans les verres de silice SiO₂ est toujours d'actualité. Le domaine de la diffraction d'objet de petites dimensions nano objets où on utilise ainsi des longueurs d'ondes de l'ordre et inférieur à la taille de l'objet. L'extension vers des plus hautes énergies confère à l'ellipsométrie des capacités liées aux facteurs de diffusion inter atomiques et est enfin une métrologie qui se rapproche directement à la photo-émission.

L'existant en matière d'ellipsométrie

- Les ellipsomètres spectroscopiques existant aujourd'hui et utilisés en production ou dans la plus part des laboratoires de recherche et développement travaillent dans une gamme spectrale qui va de l'infra rouge au visible (jusqu'à 6 eV). On assiste à un développement vers des énergies de photons plus élevé (9 eV 140 nm), récemment disponible : le PUV de Sopra (limité par sa séparatrice d'ordre) ou le système équivalent de John Woollam (146nm) et Jobin Yvon (modulateur photo élastique en MgF₂). Ce domaine est malheureusement encore trop limité, étant encore bien inférieur au gap d'absorption de la silice (SiO₂) !. La conception du système développé dans le labo a permis de monter cette limite à 115nm (même avec un environnement sous purge d'azote). C'est le résultat d'une expérience constamment développée et supportée initialement par le Cnet et le Leti depuis de nombreuses années. Aujourd'hui la limite spectrale provient de la source elle même, bloquée en dessous de 100 nm et aussi bien des polariseurs en MgF₂ lorsque ce matériau devient absorbant.

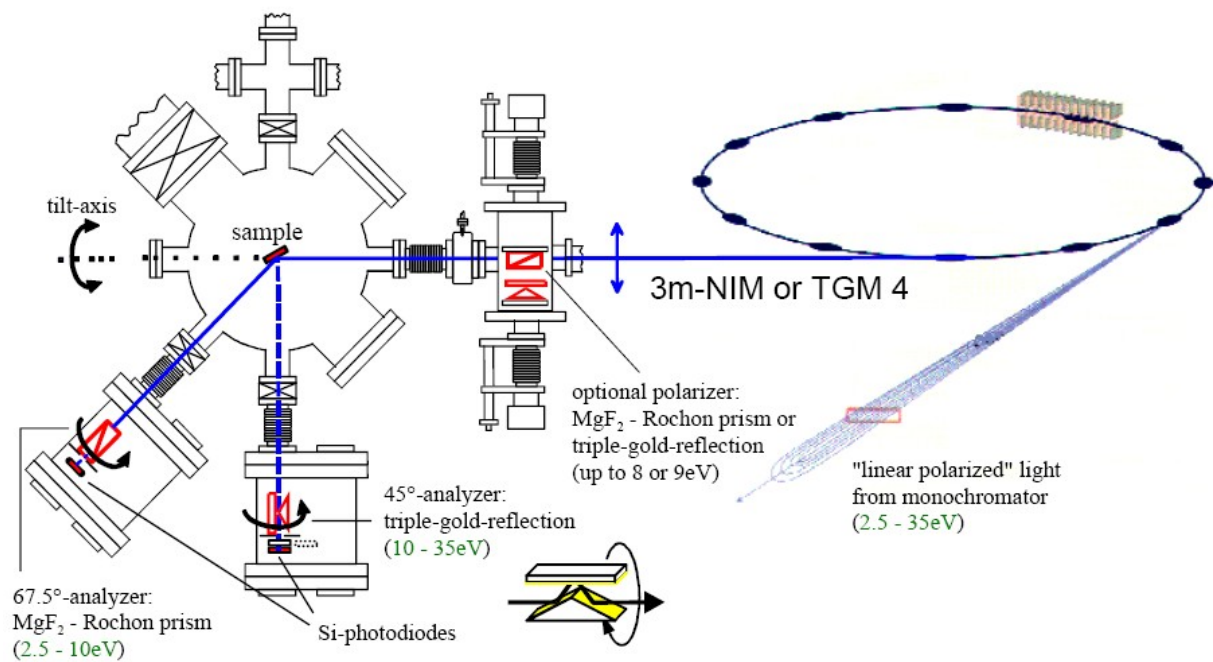
Nous rappelons dans ce chapitre l'état de l'art pour ce qui concerne l'ellipsométrie et les sources UV

Ellipsométrie:

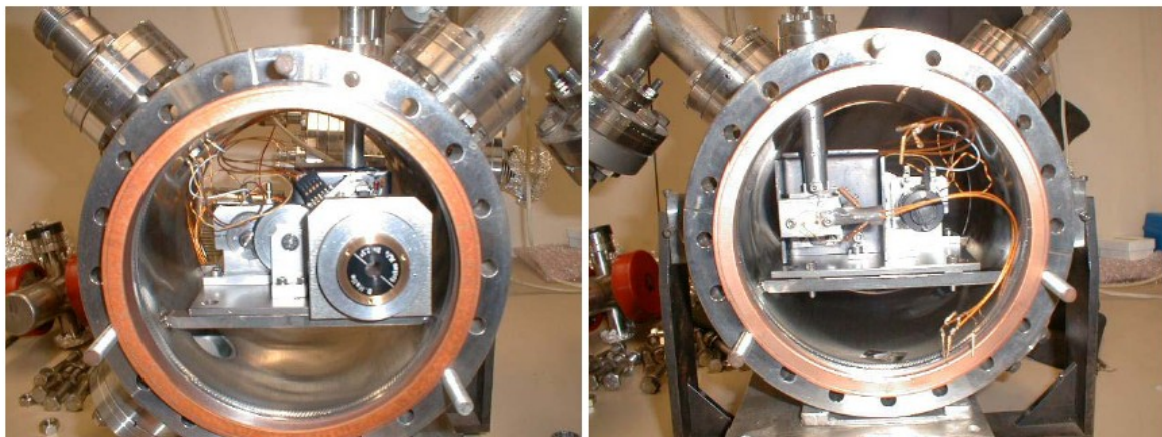
Les composants Optiques :

L'ellipsométrie est une méthode courante pour mesurer l'épaisseur de couches et/ou leur indice de réfraction. Cependant, elle est utilisée, au niveau industriel, uniquement dans le domaine visible ou proche UV. Dans le domaine UV peu de réalisations ont été faites. Nous avons noté seulement l'ellipsomètre développé sur le synchrotron BESSY de Berlin en Allemagne présenté en figure.

Des développements analogues sont effectués au Japon mais autour de 100eV. L'appareil a été validé sur des structures de type SOI. Cet ellipsomètre a en quelque sorte le statut de « facility » du synchrotron allemand ou de son équivalent japonais. Des mesures effectuées par le LETI/DTS avec l'ellipsomètre de Bessy ont permis de montrer ses avantages mais surtout le peu de souplesse d'accès à ce type d'appareil qui reste néanmoins peu adapté aux mesures de couches minces. Le schéma ci-dessous donne néanmoins un exemple de réalisation de ce type d'appareil.



until 1999 at BESSY I; 2002: start of operation at BESSY II
Experimental Setup: Analyzer Chamber



67.5° analyzer chamber with rochon prism

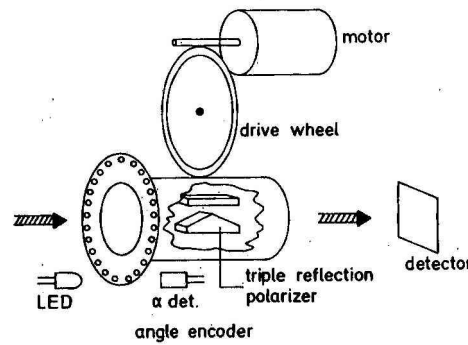
45° analyzer chamber with diode and gold analyzer

- Rotating analyzer module placed inside UHV-chamber
- Special solutions required to provide UHV pressure (10^{-10} mbar)

Figure 1 : l'ellipsomètre UV de Bessy

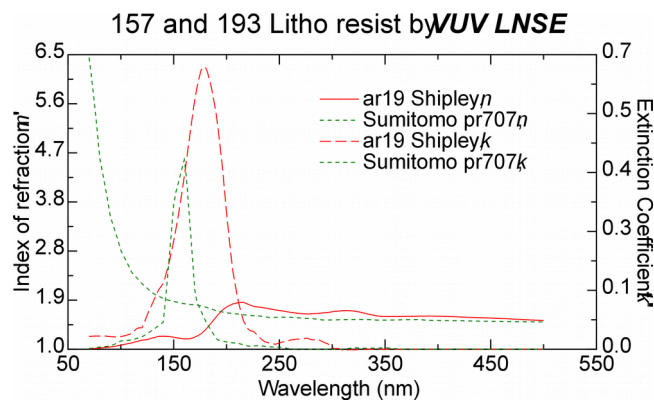
Le faisceau de lumière polarisée issue de la ligne synchrotron (M) arrive en incidence sur l'échantillon S situé au centre du bâti ultravide (pompage par le piquage TP). Le faisceau passe par le biais du polariseur fixe P. Le système est couplé par l'intermédiaire de RF (rotating flange) qui permet orienter mécaniquement en rotation (T) l'ensemble du bâti et positionner exactement la direction de polarisation de la lumière par rapport au plan d'incidence de l'échantillon. Suivant la gamme spectrale choisie deux analyseurs tournants

sont disponibles (RA1 ou RA2) . L'analyseur tournant (moteur et optique) sont ainsi montés sous vide



Schematic of rotating analyzer.

avec les détecteurs adaptés pour chaque gamme spectrale. (multiplicateur d'électrons ou diode) couplés à des polariseurs sous incidence de Brewster réalisés avec des miroirs de platine ou d'or (voir insert 2a, figure 1), (30-130nm) et Rochon MGF2 avec Photomultiplicateur diamant (130-200nm). Il faut donc pouvoir faire tourner l'échantillon de façon à l'orienter suivant la gamme choisie tout en gardant le même angle d'incidence (75 degrés). Dans cette dernière gamme (130-200nm), le LETI/DTS a déjà construit un appareil sous atmosphère inerte N₂ (azote), qui permet de réaliser l'analyse d'échantillons pour la lithographie 157nm (fournisseur Shipley et Sumitomo) comme on peut le voir sur la figure 2 représentant les indice n et k mesurés avec cet appareil.



Indices optiques n,k de résines pour la lithographie.

Aujourd'hui on sait comment construire un ellipsometre spectroscopique jusqu'environ 40 eV. Ces travaux existants dans la littérature sur l'ellipsométrie et la mesure de réflectivité correspondent à un environnement lié à la disponibilité d'une source Synchrotron comme celle par exemple de Bessy II à Berlin. Cependant il s'agit de procédure d'analyses lourde à mettre en place et qui ne correspondent pas du tout aux besoins de l'industrie où l'aspect compacité rendement de mesure et mètres carrés de salle blanche sont impératifs

Les propriétés des matériaux déjà explorées dans le domaine des X VUV sont extrêmement riches d'informations. Dans les structures des bandes d'absorptions on peut relever la présence et le

caractère de transitions électroniques inter orbital ($p \rightarrow \sigma$ de l'oxygène dans les oxydes de terres rares par exemple) et vers la bande de conduction. Un aboutit à une spectroscopie réelle observable par ellipsométrie. Pour ce type d'analyse une première limite intéressante correspondant à ces type de transitions observées sur des résultats publiés Al_2O_3 et $SrTiO_3$ est environ 40 eV. Au de là, la transparence des matériaux est pratiquement réelle on peut observer des transitions de « cœur » lié au facteur de diffusion atomique et leur proche environnement. C'est alors le domaine exploré jusqu'à présent par la photo émission.

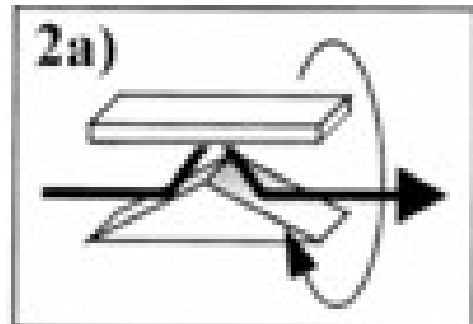
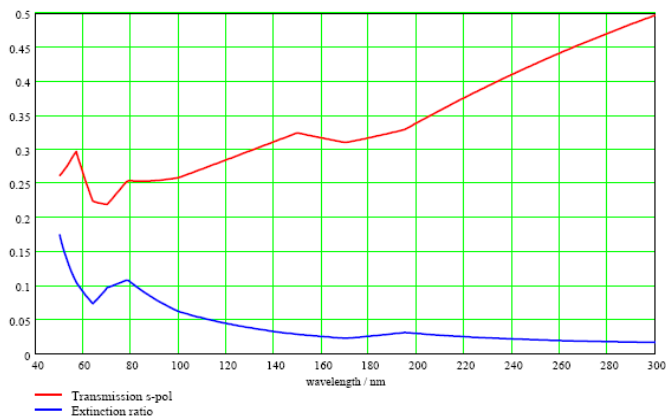
Cette technique devient ainsi plus qu'un simple moyen de mesurer des épaisseurs : un rôle qui lui a longtemps uniquement attribué.... Elle devient aussi complémentaire à deux techniques analytiques: la spectroscopie par perte d'énergie des électrons (EELS) et la photo émission

Il existe aujourd'hui un moyen d'introduire une telle métrologie dans l'extrême ultraviolet avec l'apparition des sources compactes modernes. Malheureusement ces dernières ont été, à ce jour, plus orientées vers des applications de lithographie à 13nm (100eV).

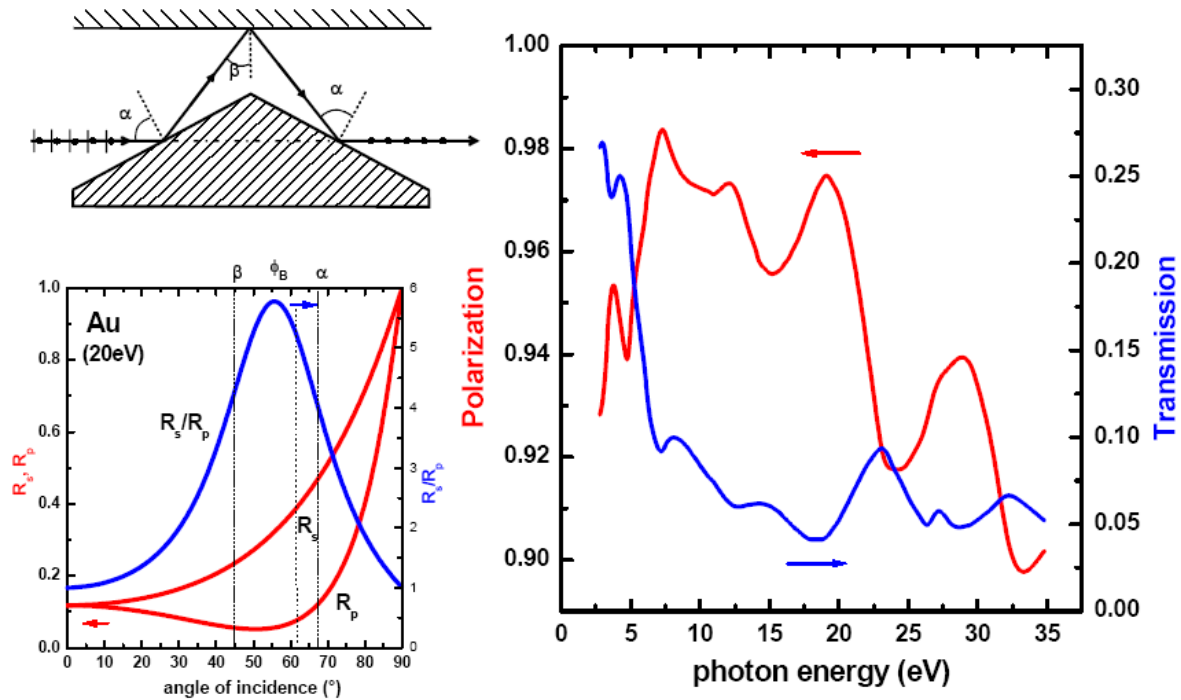
Les polariseurs sont réalisables jusqu'à 80eV environ par des techniques de réflexion classiques à l'angle de Brewster (miroirs dorés (Au) à 130 degrés).

Schéma d'un polariseur à miroir et performance pour un angle de 76 degree

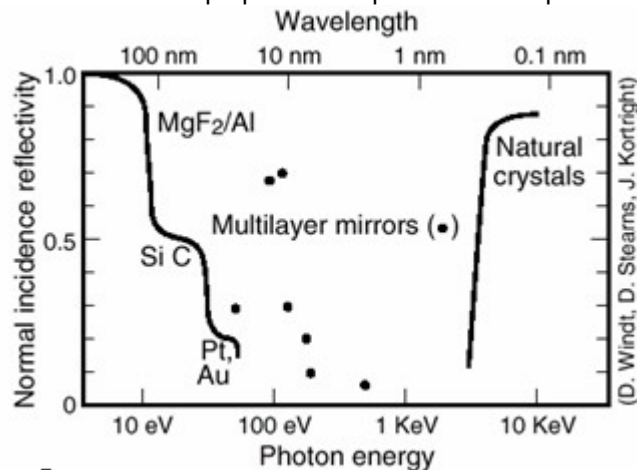
Performance of a reflecting gold polarizer
(triple reflection at 76°)



Triple-Gold-Reflection Polarizer



Au delà de 80 eV les technologies multicouches permettent des coefficients de réflexion bien supérieur aux éléments optiques type miroirs, polariseurs et réseau. Le schéma ci-dessous donne les différentes gammes spectrales avec les optiques correspondantes les plus adaptés.



A plus hautes énergies, les développements modernes des multicouches sont très prometteurs. On utilise des techniques de lift-off sur des multicouches MoSi pour réaliser des polariseurs en transmission.

L'électronique : l'intérêt d'une source continue

Une autre remarque apparaît avec le caractère pulsé des sources potentielles concurrentes de la RCE, elles nécessitent des électroniques suffisamment rapides et délicates telle que celle utilisée dans les domaines du TOF SIM.

Bien qu'elles offrent la possibilité d'étude par ellipsométrie de phénomènes transitoires utilisant la fréquence de 100KHz de la source Capella par exemple, elle sont beaucoup moins faciles à gérer qu'une source plasma RCE continue et cela également en matière de bruit intrinsèque qui limite la précision de mesure en ellipsométrie.

Les présents développements technologiques aboutissent à une source RCE miniaturisée à aimant permanent. Associée à l'Ellipsométrie Spectroscopique dans les gammes 6-40eV et 100eV permettent d'observer des caractères intrinsèques d'ordre à courte et longues distances dans l'état solide.

Un ellipsomètre spectroscopique associé à une source plasma RCE doit être mis en place avec la collaboration de partenaires industriels concernés (sourciers, optique de couplage), mais il doit rester du domaine d'étude de faisabilité dans une première étape. Cela permettrait d'assurer la cohérence avec des campagnes de mesures de calibration tel que l'on pourrait les réaliser en testant des parties de l'appareil ou en comparant les mesures sur une ligne synchrotron que seul un organisme de recherche peut engager.

1 LA SOURCE PLASMA RCE

L'ellipsomètre décrit ici utilise un type de source à technologie innovante : la source continue de type plasma RCE.

ii) la source ECR à aimants permanents :

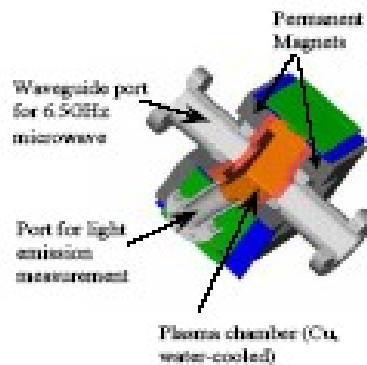


Figure 1. Compact Microwave Plasma Generator with its components

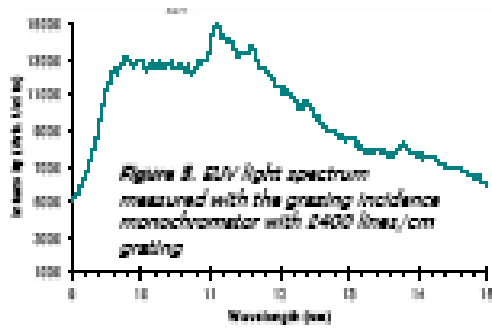
Ce dernier type de source est développé dans plusieurs laboratoires au niveau mondial. (ici le schéma de celle du Lawrence Livermore National lab en Californie), mais également au sein du Cea (DRF SBT) à Grenoble. L'intérêt primordial pris par la source ECR à aimants permanents, gamme 10-14 GHz, à densité électronique est le flux élevée de cette source et son application favorable à la conception/adaptation d'un ellipsomètre utilisant ces gammes de longueur d'ondes. Ce brevet décrit ainsi comment une telle source peut être adaptée et les options à définir pour la réalisation de l'ellipsomètre spectroscopique correspondant.

Un plasma RCE (pour Résonance Cyclotronique Electronique), est une décharge plasma sous vide en champ magnétique, produite par l'interaction résonnante entre une onde électromagnétique Haute Fréquence (HF) et les électrons du plasma. Lorsque la fréquence de

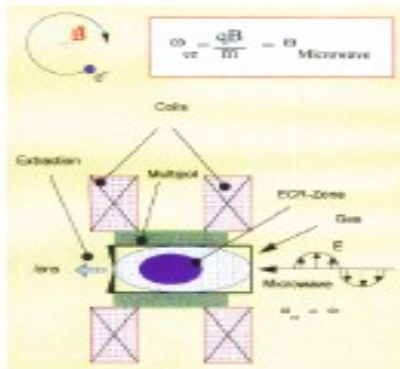
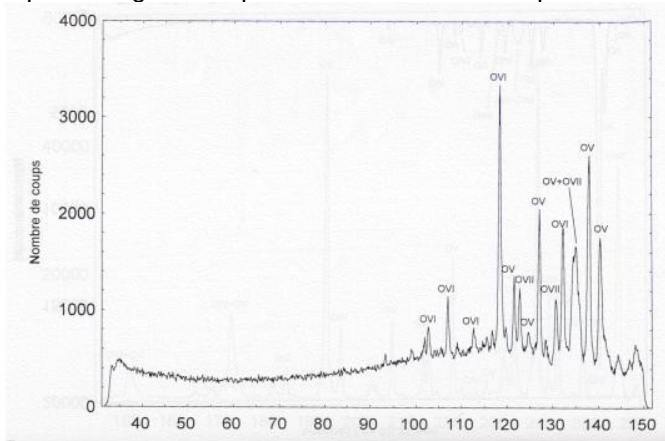
Larmor des Electrons $\omega_{ce} \equiv \frac{eB}{m_e}$ (e la charge de l'électron, B le champ magnétique dans le plasma,

m_e la masse de l'électron), est égale à la fréquence de l'onde HF incidente ω_{HF} , l'électron acquiert de l'énergie, ce qui lui permet d'ioniser les atomes injectés dans la chambre.

Son optimisation est inspiré du travail réalisé sur les sources d'ions multichargés RCE. En effet, pour caractériser le plasma de ces sources d'ions le rayonnement UV de ce plasma a été observé [Hitz, Berreby]. La figure montre l'émission UV issue d'une source d'ions RCE qui a été mesurée à des fins de caractérisation du plasma : on y voit des raies UV issues du plasma (ici l'oxygène). Suivant les conditions d'utilisation on peut ainsi favoriser le fond continu (Bremstrahlung ou un spectre de raies)



a) Bremstrahlung il peut être optimisé sur une importante gamme spectrale en modifiant les paramètres de la source



b) spectre de raies

Cette source produit des ions multichargés par le processus suivant : dans une chambre à vide magnétisée par un système dit « en minimum-B », décrit ci-dessous, on injecte une onde HF qui interagit avec les électrons du plasma à la fréquence de Larmor de ceux-ci. Du fait du confinement apporté par la structure en minimum B, les électrons interagissent souvent avec l'onde, ce qui leur permet d'atteindre des énergies suffisantes pour ioniser les atomes par impact électronique jusqu'aux couches profondes. La structure magnétique en minimum-B se décompose comme suit (voir figure) :

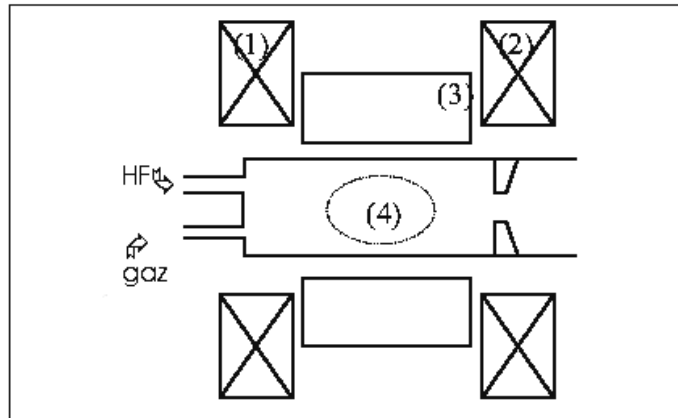


Figure : schéma d'un plasma RCE

Des bobines (1) et (2) créent un champ miroir ; un hexapôle (plus généralement un multipôle) est situé entre ces bobines et crée un champ radial. La superposition des champs miroir et hexapolaire constitue une structure « à minimum-B ». Pour qu'une source d'ions multichargés fonctionne d'une manière satisfaisante et produise des ions multichargés, il faut que la surface de résonance (le lieu

des points r tels que la valeur de la fréquence cyclotronique électronique locale $\omega_{ce}(r) \equiv \frac{eB(r)}{m_e}$ est

égale à la fréquence de l'onde HF) soit une surface fermée dans la chambre à plasma (4) [Geller, et références des brevets]. Les solénoïdes (1) et (2) peuvent être remplacés par des aimants permanents. On se référera à une revue sur les sources d'ions RCE a été faite par R. Geller [Geller] :

1. Une structure magnétique confinant est nécessaire : simple miroir, ou bien minimum-B
2. Les électrons du plasma doivent acquérir une énergie suffisante pour exciter les raies UV d'intérêt. Pour l'ellipsométrie, des raies entre 5 et 40 eV sont nécessaires ; il est également des applications pour du rayonnement à 100 eV. Bien entendu, plus on aura besoin de raies à haute énergie et plus il faudra des électrons énergétiques dans le plasma RCE.

Pour produire de l'UV entre 5 et 40 eV : la structure confinant peut être un miroir simple, c'est-à-dire sans hexa pôle, avec les seuls bobines (1) et (2) ; le profil de champ magnétique doit être tel que le champ de résonance B_{res} (tel que $\omega_{ce}(r_{res}) \equiv \frac{eB_{res}}{m_e} = \omega_{HF}$) se trouve, sur l'axe, en deux points du miroir (figure).

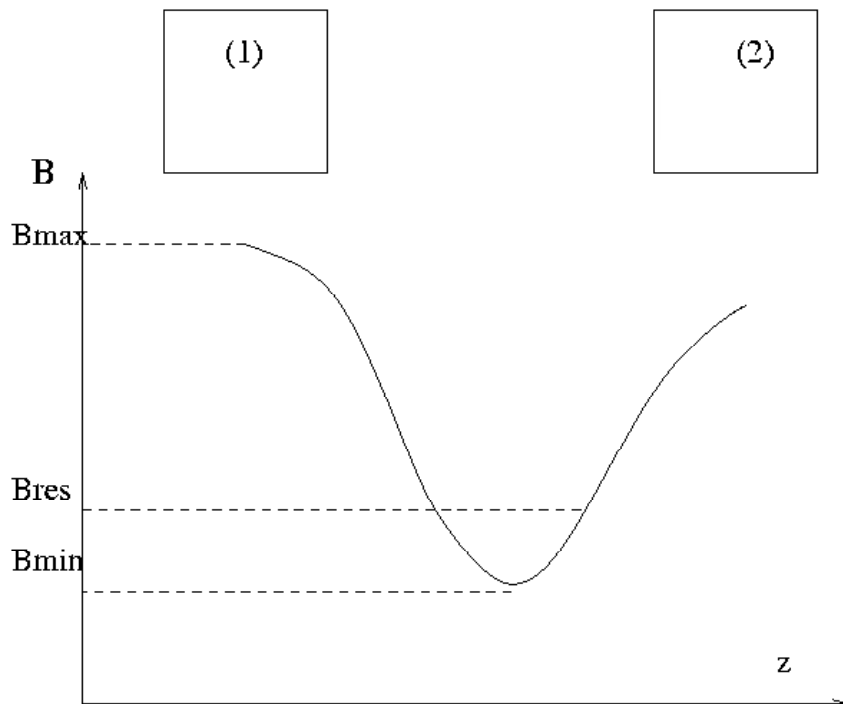


Figure : le champ magnétique axial dans le plasma (le profil peut être indifféremment symétrique ou dissymétrique par rapport au minimum B_{min}). B_{res} est le champ de résonance. (1) et (2) sont les deux bobines réalisant le miroir.

Pour produire de l'UV au delà de 40 eV (mais une telle structure produit aussi de l'UV de 5 à 100 eV) il faut une structure à minimum-B (miroir + hexapôle).

Description détaillée de la structure « universelle » à minimum-B (on se réfère à la figure) :

Les bobines (1) et (2) peuvent être : (i) des solénoïdes alimentés par des courants variables ; (ii) des aimants permanents à aimantation axiale ; (iii) des aimants permanents avec une aimantation radiale (comme la bobine (1)) , mais avec un sens opposé, ou enfin toute combinaison de ces solutions techniques. La solution où la bobine côté ellipsomètre : bobine (2), est un aimant permanent à aimantation radiale est particulièrement intéressante. En effet, il en résulte des lignes de champ qui convergent sous la bobine (2) (figure 7). Ainsi les particules chargées (électrons, ions) formant le plasma ont tendance à aller vers la paroi de chambre, et elles ne risquent pas de sortir de la chambre à plasma où elles pourraient provoquer des dommages sur les éventuelles optiques (miroirs MoSi par exemple). Pour supprimer les dernières particules chargées qui pourraient quitter la chambre à plasma on peut ajouter un filtre magnétique après la bobine (2).

Pour que l'efficacité en UV soit optimale, l'iso-valeur de champ $B=B_{res}$ doit être fermée dans la chambre à plasma (forme (4) sur la figure 4). De plus, pour générer un rayonnement UV adapté à l'ellipsométrie, on injecte un mélange de He, N₂, O₂, Ne, Ar, Kr, Xe en proportion de 0 à 100% . Par ailleurs d'autres composés gazeux (type ferrocène, nickelocène, silane) peuvent être injectés dans la chambre à plasma. L'oxygène doit être introduit en petites proportions afin de ne pas causer de dommages sur les autres éléments sous vide.

Afin de maximiser la production d'UV, on ajoute une sonde polarisée sur l'axe, du côté de l'injection de l'onde HF. Cette sonde, polarisée négativement par rapport à la chambre à plasma à la tension V_s , permet de confiner de manière électrostatique les électrons qui ont une énergie inférieure à eVs. Enfin, on dispose une sonde S2 de forme cylindrique, isolée de la chambre à plasma, sous la bobine (2), polarisée négativement par rapport à la chambre à plasma. Cette sonde a la même fonction que la sonde S1.

¹R. Berreby, thèse de l'Université Paris VI, 1997.

D. Hitz, R. Berreby, M. Druetta « Diagnostic of the ECR Caprice ion source » Physica Scripta T80 (1999) 511-513

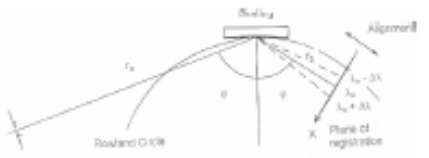
R. Geller, « Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas », Institute of Physics Publishing, Bristol, 1996.

ELLIPSOMETRIE UV AVEC UNE SOURCE PLASMA RCE :

Collection de l'émission VUV de la source : nous reproduisons ici la solution proposée par le groupe du LLNL dans le cas d'une émission à 13nm c'est à dire le même cas que la source de AIXUV. Le système est appliqué ici à la lithographie la sélection en longueurs d'ondes se faisant par le biais initial d'un grating spectrometer (reseau) puis ensuite par un miroir MoSi pour optimiser le coefficient de lumière réfléchi dans le cadre d'une application de lithographie

EUV Measurement Concept

Light is emitted from radiative recombination processes in the ECR plasma. Recombination results in production of excited states of the Xe ions. Light emission from the ions is isotropic, but the plasma density distribution in the ECR might produce global light emission structure.



Wavelength of emitted light can be selected with a grating spectrometer. GS can be fabricated so that light in the desired wavelength regime can be diffracted. The diffraction condition is (See Figure 4.):

$$d (\sin \phi - \sin \psi) = n\lambda$$

The achievable dispersion is given by:

$$D = \Delta\lambda/\Delta x = \Delta\lambda/r_b \Delta\psi = d \cos \psi / r_b$$

Figure 4. Diffraction of light.

Once a spectrum has been recorded and 13.5 nm emission has been identified, and optimized, the grating can be replaced with a Mo-Si mirror with high efficiency of 13.5 nm reflection. One can now place a piece of EUV resist in front of the detector, with a little mask pattern on the resist. Exposure of this resist with EUV for series of time intervals, followed by resist development allows a fairly accurate determination of the effective flux at 13.5 nm into this piece of solid angle.

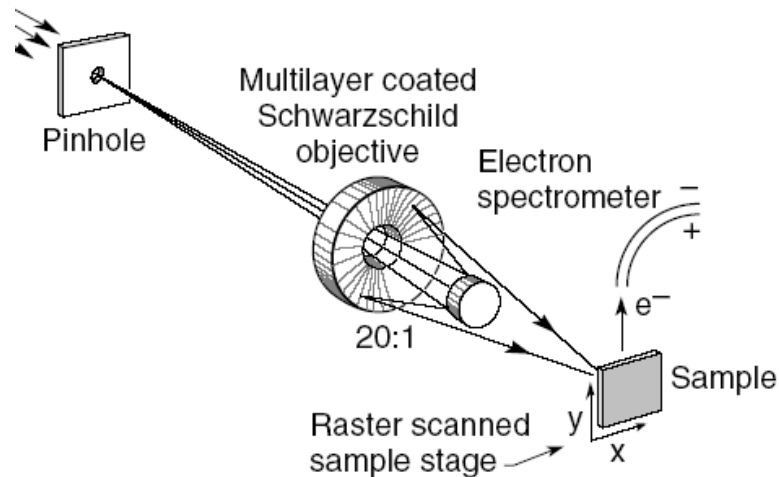
- Couplage des sources, objectif Schwarzschild ou optique Cassegrain.

Le rayonnement UV produit par la source RCE est donc soit envoyé directement sur un monochromateur, pour irradier un ensemble analogue à celui de la figure 1. Soit le rayonnement est focalisé par des miroirs (par exemple en MoSi) et ensuite envoyé sur le monochromateur. On propose également deux montages optiques permettant d'associer flux maximum (Cassegrain) parallèle ou convergent (objectif de Schwarzschild) qui doit fonctionner avec un tel type de source. Dans ce

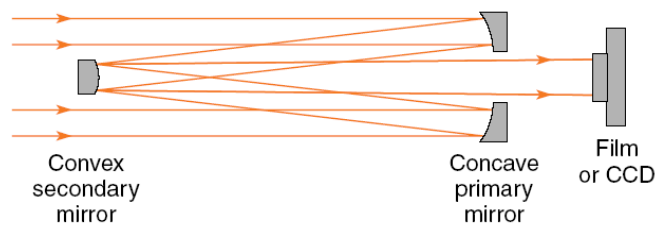
¹ D. Hitz, R. Berreby, M. Druetta « Diagnostic of the ECR Caprice ion source » Physica Scripta T80 (1999) 511-513

R. Geller, « Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas », Institute of Physics Publishing, Bristol, 1996.

dernier cas il faut ensuite sélectionner le faisceau réfléchi par l'intermédiaire d'une fente limitant ainsi sa divergence.



Exemple d'un montage utilisant un objectif de Schwarzschild (montage convergent XPS)
 Dans notre cas la source serait ici a la place du « raster scanned sample stage » pour focaliser ensuite sur la fente du monochromateur.(désigné ici par le pinhole)



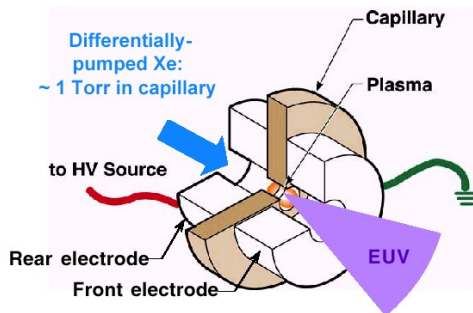
Cas d'un objectif type Cassegrain pour réaliser un faisceau parallèle les optiques en dépôt Au ,Pt ou Ir permettent de faibles pertes même à cette gamme d'énergie. La source se trouve ici à la place du film dans le schéma inverse on utilise un ccd ou mcp comme détecteur.

- Réseaux et détection avec électronique transitoire

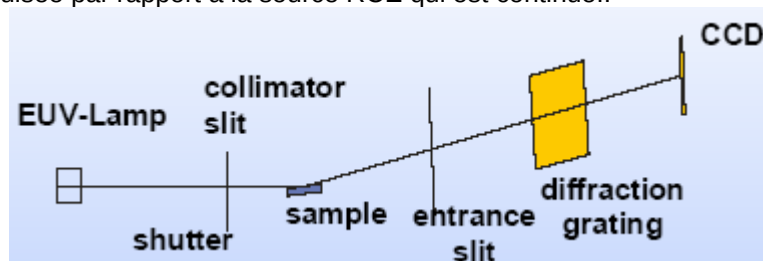
Les plasmas RCE pouvant être indifféremment pulsées ou continus, la chaîne de détection du rayonnement peut être pulsée ou continue suivant le type d'applications. Ce qui est un des avantages décisif par rapport aux autres sources notamment en ce qui concerne la précision de mesure qui est limitée par le bruit intrinsèque de la source. L'ellipsomètre spectroscopique adapté se fonde à partir des solutions existantes dans la littérature dans un concept de métrologie intégré et couvre une gamme d'énergie de photons jusque là non conventionnelle par rapport à l'existant avec un domaine spectral allant du proche ultraviolet.(5eV) jusqu'à des énergies de Photons de l'ordre de 100eV(13nm) la limite du rayonnement X mou. Dans ce choix un premier domaine 5-30 eV couvre l'ensemble des transitions inter bandes des diélectriques et nouveaux matériaux utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs. Dans cet gamme d'énergie les éléments polarisants sont bien connus prisme de Rochon en MgF2 CaF2 ou LiF jusqu'à 9 eV puis ils doivent être substitué à des polariseurs type Brewster métallique utilisés à ce jour jusqu'à plus de 60 eV. A plus hautes énergies des photons, (jusqu'à 100eV ou 12.4nm), la plus part des matériaux ont des indices voisins de l'unité, la zone d'intérêt correspond en microélectronique au voisinage de la L₂L₃ du Si (97eV).

Comme cela est démontré par l'équipe du Fraunhofer qui a testé la source AIXUV. On peut donc penser à un système où le choix de polariseur se fasse suivant la gamme spectrale par le biais de voies différentes ou de « magasin ».

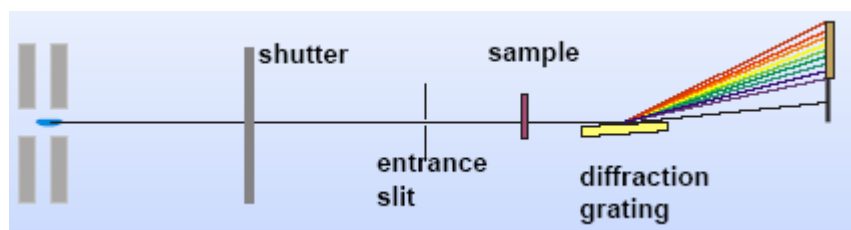
Il nous semble qu'en Europe, les sources à décharges électriques sont légèrement plus avancées que les sources plasmas produites par laser pour le 13.5 nm. En particulier la source d'AIXUV (Aix la chapelle en Allemagne), Capella (GREMI France), la GDPP d'Extrem technologies (Lamda physik Göttingen Allemagne) ont été spécifiquement développées pour le 13.5 et ont été intégrées sur des appareillages scientifiques. L'unique concurrence commerciale pour ces sources de métrologie est en Allemagne (AIXUV) où pour ce type de source des résultats de réflectométrie ont déjà été présentés.



Il va de soit que leurs auteurs ont dus se protéger industriellement dans ce domaine en ce qui concerne la métrologie. L'intérêt de ces résultats ici est de démontrer la faisabilité d'un tel montage avec une source pulsée par rapport à la source RCE qui est continue..

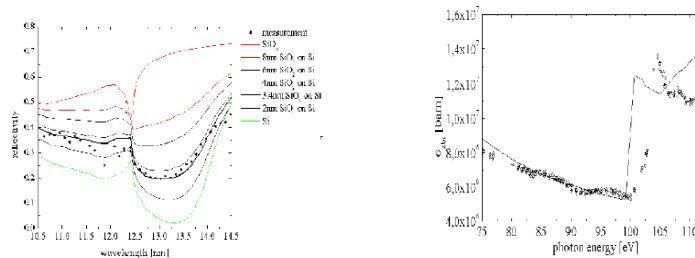


a) Montage en réflexion



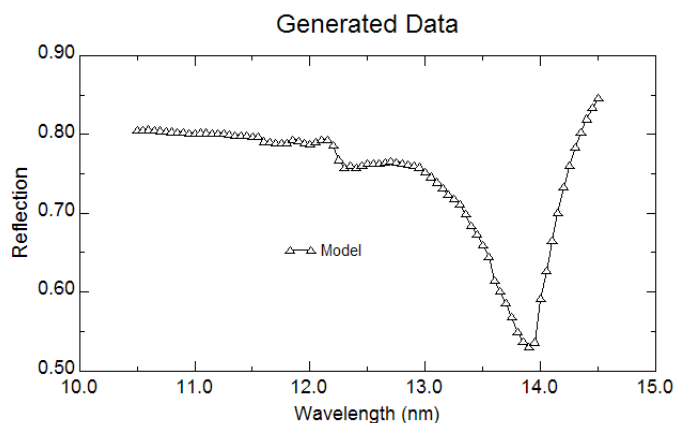
b) Montage en transmission

Figure . Deux schémas classiques d'expérience de réflectométrie proposés et utilisés dans la description de la source développée par AiXUV et les mesures correspondantes sur des échantillons d'oxydes de silicium autour de l'absorption L_2 L_3 du silicium a 97 eV.



Des résultats assez proches de ce que l'on peut estimer par modélisation

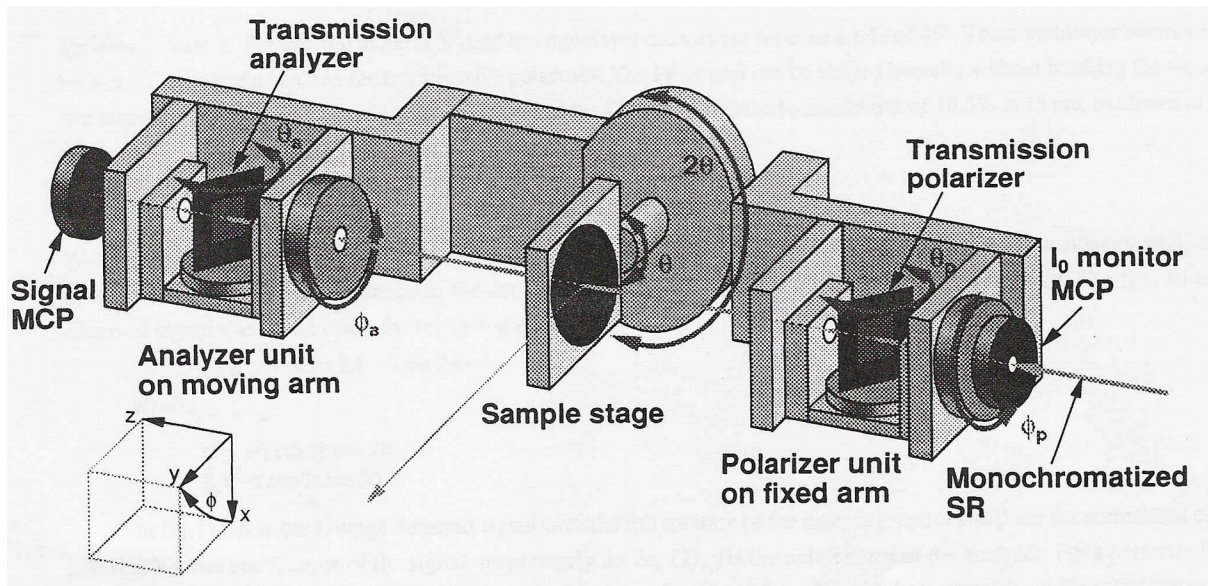
1 a-sio2_palik	1 nm
0 si_palik	1 mm



et à partir de la littérature ((P.Tripathi,G.S.Lodha,et al Optics Comm. 211,215-223(2002) "Optical constants of silicon and silicon dioxide using soft X-ray reflectance measurements" ou encore « interferometric investigation of the Si-SiO₂ inter region at wavelengths of the 110-130 Å° W.Blau, E. S. Gluskin and K.Hübner dans Nucl. Instr. and Methods 208 605-608. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que ces résultats s'obtiennent en quelques millisecondes dans le cas du montage de AixUV !.

Le montage Ellipsometrie : Nous rappelons différents montages polarimètres qui sont applicable dans la gamme d'énergie : Des polariseurs à triple réflexion existent et ont été utilisé jusqu' plus de 60eV. Certains sont disponible commercial tels chez Halle (Berlin) qui a réalisé celui de l'ellipsometre de Bessy (135 degrés prisme , miroir plan dépôt Au (R. L. Johnson, J.Barth and M. Cardona dans Rev. Sci. Instr.,60,7,2209 (1989).)

ou plus récemment 5-80eV T. Koide, T. Shidara, M. Yuri, N. Kandaka, Nucl. Instr. and Methods in Physics Research A 308 (1991)635-644.



Le schéma de l'ellipsometre à réaliser se décompose de la façon suivante qui correspond à l'appareil optimisé autour de 100eV en technologie polariseur analyseur en transmission.(SPIE Conf. San Diego Ca July 1998 T. Haga, Y. Utsumi, S. Itabashi SPIE, vol 3443-p117).

Un tel système peut correspondre aux deux configurations possibles ici en analyseur tournant RAE. On peut dédier deux voies correspondant soit à un couplage par des polariseurs analyseur multicouches Mo/Si à 13nm ou des éléments à miroirs avec une incidence de 135 degrés (Brewster). Il se base sur une configuration de polariseur multicouches en transmission Mo/Si optimisés pour des mesures à 13nm de longueurs d'ondes. On peut à partir de ce concept remplacer ces éléments par des polariseurs à triple réflexion jusqu' plus de 60eV