



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

b134396

S/MZ

~~97/11~~

2

THESE DE DOCTORAT

Spécialité :

Physique et Physico-chimie de la matière et des matériaux.

Présentée par :

Bruno AUGÉ

pour obtenir le grade de docteur de l'Université de METZ

MODELISATION, ETUDE,
 REALISATION D'UN INTERFEROMETRE
 IN-SITU, TEMPS REEL DESTINE AUX
 MESURES DIMENSIONNELLES
 DES PUCES ELECTRONIQUES
 SUBMICRONIQUES PENDANT UN PROCEDE
 DE GRAVURE OU DE DEPOT.

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv.	19970605
Cote	S/M3 97/28
Loc	Magasin

Soutenu le 10 Avril 1997 devant la commission d'examen :

M. Roland Kleim
 M. Jean Canteloup
 M. Ramdane Benferhat
 M. Frédéric Ferrieu
 M. ...
 M. ...

Directeur de thèse
 Directeur de la société Sofie Instruments
 Rapporteur
 Rapporteur
 ... du Jury
 ... du Jury

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE METZ



022 234153 8

~~EXCLU DU PRET~~

SOMMAIRE

Avant - propos	6
Introduction	7
I. Choix des techniques	11
I.A). Définition d'un plasma.....	11
I.B). Principe de création d'un plasma.....	12
I.B.a). Décharges en courant continu.....	12
I.B.b). Décharges en courant alternatif.....	13
I.B.b.1). Décharges Basse-Fréquence.....	14
I.B.b.2). Décharges Radio-Fréquence.....	14
I.B.b.3). Décharges Hyper-Fréquence.....	15
I.C). Caractérisation d'un plasma.....	15
I.D). L'équipement de gravure.....	20
I.E). Méthodes optiques de diagnostic et de contrôle des procédés.....	21
II. Aspects Théoriques	25
II.A). Propriétés optiques des systèmes multicouches.....	25
Les ondes électromagnétiques.....	25
Energie d'une onde électromagnétique.....	26
Interférences de deux faisceaux lumineux.....	27
Différence de marche.....	30
Réflexions multiples sur des surfaces à faces parallèles.....	31
II.B). Détermination de l'épaisseur.....	33
II.B.1). Méthodes optiques de détermination de l'épaisseur d'une couche transparente sur un empilement.....	33
II.B.1.1) Principe de l'interférométrie spectroscopique.....	33
II.B.1.1.1). La méthode des extrema.....	33
II.B.1.1.2). Méthode d'optimisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.....	34
II.B.2). Modélisation des système à une couche sur un substrat absorbant.....	35
Formalisme d'Abelès.....	35
II.B.3). La simulation.....	41
II.B.3.1) Les lois de dispersion des indices de réfraction et d'absorption n et k	41
II.B.3.2). Les résultats.....	43
II.C.a). Imagerie - Positionnement.....	48
II.C.a.1). Avant-propos.....	48
II.C.a.2). La recherche de motif.....	48
II.C.a.3). La corrélation discrète.....	48
II.C.a.4). La fonction MATROX.....	49

II.C.a.4.1). Optimisation du calcul.	50
II.C.a.5). Intercorrélation - Autocorrélation.	51
II.C.a.5.1). Le motif et l'image.	51
II.C.a.5.2). L'autocorrélation.	52
II.C.a.5.3). L'intercorrélation.	52
II.C.b). Imagerie - Mesures dimensionnelles.	54
II.C.b.1). Mesures de surfaces.	54
II.C.b.2). Autofocus de la caméra.	54
III. Développement Expérimental	56
III.A). Expérimentation préliminaire sur la mesure d'épaisseur.....	56
III.A.1). Choix et description du système.....	56
III.A.1.1). Synoptique de la mesure dimensionnelle.	56
III.A.1.2). La source lumineuse.	57
III.A.1.3). La caméra CCD.	58
III.A.1.4). Le capteur.	59
-Le monochromateur.	60
-Le détecteur.	60
-L'intensificateur d'images.	61
-Montage d'utilisation générale.....	61
III.A.1.5). La carte d'acquisition SOF 30721.	61
III.A.1.6). L'unité centrale.	62
III.A.2). Organigramme du logiciel.....	63
III.A.3). Les résultats.....	63
III.A.3.1). Validation préliminaire de la détermination d'épaisseur.	63
III.A.3.2). Mesures d'épaisseurs sur site.	64
III.A.3.2.1). Le Nanospectromètre.	64
III.A.3.2.2). Les résultats.	64
III.A.3.2.2.a). Résultats statiques.	64
III.A.3.2.2.b). Résultat dynamique.	68
III.B). Expérimentation préliminaire sur l'imagerie et le positionnement	68
III.B.1). Choix et description du système.....	68
III.B.1.1). Schéma général de l'expérimentation.	68
III.B.1.2). La caméra.	69
III.B.1.3). La table motorisée deux axes XY.	69
III.B.1.4). La carte d'acquisition vidéo.	72
III.B.2). Le positionnement.....	73
III.B.2.1). Le programme.	73
III.B.2.2). Paramétrage des fonctions.	78
III.B.2.2.1). L'image.	78
III.B.2.2.2). Le motif.	78
III.B.2.2.3). La recherche.	79
III.B.2.2.4). Les déplacements.	80
III.B.2.2.5). Le positionnement.....	80
III.B.3). Analyse des résultats.....	80
III.B.3.1). Chronométrage des fonctions.....	80
III.B.3.2). Précision de la recherche.	81

III.B.3.3). Dimensions d'un pixel.	82
III.B.3.4). Effets de la rotation de la tranche.	82
III.B.3.5). Calibrage pixel - pas moteur.	83
III.B.3.6). Reproductibilité du positionnement.	85
III.B.3.7). Influence de l'initialisation des moteurs.	88
III.B.3.8). Causes d'échecs possibles.	89
IV. Applications	90
IV.A). Procédé Recess : application de la méthode Simplex.....	90
IV.B). Procédé AB.....	93
IV.C). Procédé Recess : validation.....	101
Conclusion	107
Bibliographie	110
Liste des figures	112

Annexes :

Les annexes ne sont pas reliées dans le présent rapport, mais dans le document intitulé "Annexe sur la modélisation, étude, réalisation d'un interféromètre temps réel destiné à la mesure bi-dimensionnelle des puces électroniques submicroniques pendant un procédé de gravure plasma."

Annexes Partie I :

1. Principe de l'interférence optique.
-formalisme d'ABELES
2. Les sources.
-Xénon
3. La caméra CCD.
4. La table XY motorisée.
5. Le détecteur.
-monochromateur SDA200
-barrette de photodiodes, CCD, Intensificateur
6. La carte d'acquisition SOF 30721.
7. Spectres cannelés, Simulation.
8. Optimisation de la mesure d'épaisseur par la méthode du simplexe.

Annexes Partie II :

1. L'image.
2. La reconnaissance d'objet.

AVANT - PROPOS

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'un contrat CIFRE, passée entre la société SOFIE Instruments, située 7, Route d'Egly à Arpajon 91290, et le Laboratoire de Physique des Liquides et des Interfaces (L.P.L.I), situé 1, Boulevard ARAGO à Metz 57078.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements :

A M. Jean CANTELOUP, qui m'a accueilli dans son entreprise et qui m'a donné les moyens de réaliser cette thèse jusqu'à son terme, c'est-à-dire jusqu'à la commercialisation de l'instrument final.

A M. Roland KLEIM, qui m'a accueilli dans son laboratoire de l'Université de Metz, sans lequel l'aboutissement de ces travaux, et plus particulièrement dans l'analyse théorique, n'auraient pu être réalisés.

A M. Christian LOUIS, pour son aide précieuse concernant la partie imagerie et traitement d'image.

A MM. Jean-Philippe VASSILAKIS, Gilles POULIN et André TITOV, pour leur travaux d'intégration et de concept logiciel, ayant permis la réalisation de l'instrumentation finale.

Au personnel de la Société Sofie, et aux membres du laboratoire L. P. L. I qui m'ont aidé durant ma thèse et que j'ai eu grand plaisir à cotoyer.

INTRODUCTION

SOFIE Instruments étudie, fabrique et commercialise, depuis 14 ans, des appareils de mesures physico-chimiques dédiés aux études mais aussi à l'exploitation industrielle des procédés de dépôt ou de gravure sèche des couches minces conductrices ou isolantes.

Ces procédés, qui gouvernent le développement des semi-conducteurs, de l'optoélectronique, des traitements optiques, thermiques, mécaniques, sont en perpétuelle évolution par l'accroissement des performances intrinsèques demandées et par les nouvelles applications qu'ils engendrent.

Ces moyens de production sont très compliqués à comprendre, donc à maîtriser et font appel le plus souvent à une approche par plan d'expériences pour les optimiser.

Un seul type d'instrument est insuffisant pour les maîtriser et les suivre. Il faut en grouper plusieurs reposant sur des principes physiques complémentaires et les faire fonctionner ensemble.

Une compétition permanente est donc ouverte pour optimiser les performances de chacun d'entre eux, en regard des progrès des technologies, les gérer ensemble en temps réel, traiter et interpréter les mesures, en tirer partie, les visualiser, les archiver, les communiquer, etc...

La gamme d'équipements, aujourd'hui disponible, est essentiellement constituée d'outils destinés aux procédés technologiques effectués à basse pression et plus spécialement à l'aide de plasmas.

Le concept général des instruments est la saisie, la mise en forme, la mémorisation et l'interprétation des mesures effectuées in-situ et en temps réel, au cours même des opérations de fabrication.

Il est ainsi possible de piloter les équipements de manière automatique, pour en améliorer la reproductibilité, augmenter les rendements et réduire les coûts.

Les progrès permanents de l'industrie des semi-conducteurs sont liés pour l'essentiel à :

- l'accroissement continu des capacités d'intégration,
- la plus grande taille des circuits de base,
- un plus grand diamètre des tranches de silicium.

Dans les années 1980, la dimension d'un transistor est d'environ 10 μm . (Very Large Scale Integration). Dans les années 1990, le même transistor a une taille d'un micron (Ultra Large Scale Integration). Les perspectives d'aujourd'hui conduisent vers une intégration encore plus grande (Giga Large Scale Integration).

	1980	1994
Nombre de transistor	64 000	64 000 000
Nombre d'étapes de réalisation	120	400
Dimension de la puce élémentaire	6 x 6 mm^2	12 x 12 mm^2

Les traits élémentaires sont de 0,8 μm pour les mémoires 16 Mégabits, ils atteindront, en production, 0,35 μm pour les mémoires de 64 Mégabits, puis 0,25 μm pour celles de 256 Mégabits.

	1995	1998	2000	2004	2007
Capacité des mémoires	64 Mb	256 Mb	1 Gb	4 Gb	16 Gb

Des ordinateurs "grand public" ayant une mémoire vive de plusieurs gigaoctets seront donc disponibles à l'approche de l'an 2000. Ils devraient être au moins cent fois plus puissants que ceux dont on dispose aujourd'hui.

Le diamètre des tranches de silicium utilisées augmente parallèlement :

	1995	1998	2000	2004	2007
Diamètre	200 mm	300 mm (R&D)	300 mm (production)	400 mm (R&D)	400 mm (production)

Cette très haute intégration demande à la fois le développement de nouveaux systèmes d'application ainsi que l'optimisation et le développement des procédés de fabrication.

Cette escalade de la technologie conduit les fabricants à des investissements considérables qui laissent dans leur sillage beaucoup de compagnies incapables de suivre ce marché.

Dans cette course aux mémoires beaucoup de sociétés, en dehors d'IBM et de SIEMENS, ont abandonné, se consacrant au développement et à la production de circuits plus spécifiques (télécommunication, radio, téléviseur, etc...).

Pour rester en compétition, il faut absolument optimiser les performances des lignes de production des circuits submicroniques avec des procédés complexes qui sont difficiles à maîtriser.

Tout un nouveau concept de mesures appelé "Process Control" est en train de se mettre en place sur une nouvelle base de machines très onéreuses : les "cluster tools".

On comprend dans ces conditions, que le contrôle in situ et en temps réel, des épaisseurs des circuits pendant des opérations de gravure ou de dépôt donne une sérieuse avance sur les concurrents.

Après avoir rappelé, dans le chapitre I, ce qu'est un plasma et comment le caractériser, une rapide présentation de l'équipement de gravure d'un de nos partenaires sera faite. Pour finir, une description des techniques de mesures d'épaisseurs compatibles avec l'environnement industriel est fournie.

Dans le chapitre II, nous ferons un rappel sur les ondes électromagnétiques et les interférences de deux faisceaux. Nous indiquerons quelques méthodes optiques de détermination de l'épaisseur d'une couche transparente sur un empilement. Finalement, les équations obtenues grâce au formalisme d'Abélès, permettront le calcul du flux réfléchi pour chaque longueur d'onde. Une série de simulation de calcul d'épaisseur sera présentée.

Avant de procéder aux mesures interférométriques, il faut positionner le spot d'analyse. Ainsi, dans la seconde partie du chapitre II, "imagerie et positionnement", la méthode de recherche de motif dans une image par la corrélation discrète sera abordée.

Le chapitre III regroupe la partie expérimentale de cette étude. On y trouvera, dans une première partie, le choix et la description du système utilisé pour la mesure d'épaisseur, la description du logiciel de simulation et de calcul d'épaisseur, et les premiers résultats associés, puis dans une seconde partie, le choix et la description du système d'imagerie et de positionnement, du logiciel et les premiers résultats associés.

Le chapitre IV décrit les optimisations mise en oeuvre dans le système final, afin d'augmenter la précision, la reproductibilité, la rapidité de la mesure par rapport aux applications industrielles.

CHOIX DES TECHNIQUES

Ce chapitre décrit sommairement ce qu'est un réacteur à plasma, donne le principe de création, et les moyens de le caractériser. Une présentation succincte de l'équipement de gravure utilisé par un de nos partenaire est faite, suivie pour finir, d'une description des techniques de mesures d'épaisseurs compatibles avec l'environnement industriel.

I.A). Définition d'un plasma :

Un plasma est un gaz ionisé contenant des atomes neutres (à l'état fondamental, excité ou métastable), des ions positifs ou négatifs, des électrons, des photons (Infra-Rouge, Visible, Ultra-Violet). L'ensemble forme un équilibre électriquement neutre. Dans la pratique, on idéalise un plasma en limitant ces constituants à trois corps :

- des atomes neutres d'une seule espèce,
- des ions positifs,
- des électrons.

L'échelle d'observation d'un plasma doit être supérieure à la longueur de Debye.

Une des caractéristiques importante d'un plasma est son taux d'ionisation α , c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'électrons n_e et le nombre total de particules du plasma $n_e + n_0$.

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0}$$

(EqIA.1)

α est toujours compris entre 0 et 1. Typiquement α varie entre 10^{-2} (plasma très ionisé) et 10^{-6} (plasma faiblement ionisé).

I.B). Principe de création d'un plasma :

Les gaz sont, en général, de très bons isolants. Toutefois, dans certaines conditions, on peut y faire passer un courant électrique de conduction. On dit alors que le gaz est le siège d'une décharge. Ces dernières sont caractérisées par l'existence de charges libres et d'un champ électrique.

Le champ électrique est appliqué entre une cathode (filament émetteur d'électrons par émission thermoélectronique) et une anode (référence des potentiels). Ces électrons peuvent ioniser les molécules de gaz et, si la pression est suffisamment élevée (10 Torr à 10^{-1} Torr), une décharge lumineuse peut être observée, suivie d'un régime transitoire puis d'un équilibre constituant un plasma équipotentiel. Le nuage luminescent observé dépend de la nature du gaz.

La tension délivrée par le générateur peut être soit continue, soit alternative.

I.B.a). Décharges en courant continu :

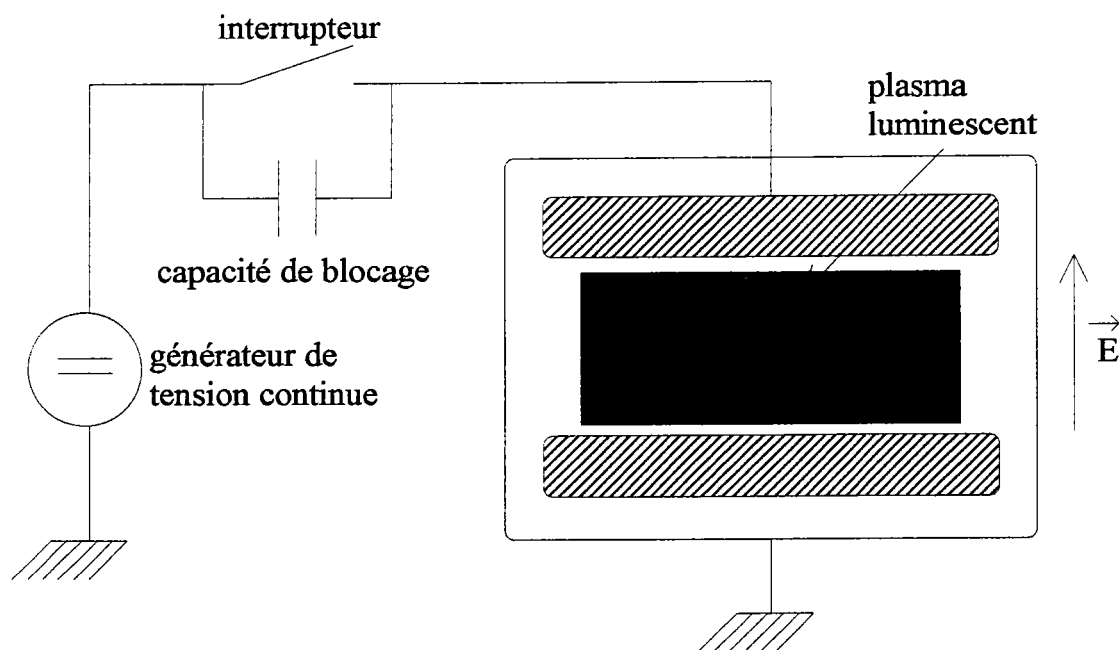


Fig.IB.1 : Décharge en courant continu.

Le champ électrique possède une direction donnée (direction des potentiels décroissants). Les ions positifs du plasma sont attirés par la cathode.

- Si la cathode est conductrice : les charges positives sont évacuées vers la masse.

- Si la cathode est isolante : les charges positives s'accumulent sur la cathode, la chargeant positivement.

⇒ La cathode finit par repousser les ions positifs.

Le potentiel plasma reste constant dans ce type de décharges car le champ électrique E ne varie pas. Par contre, il arrive fréquemment que le traitement de surface par plasma

pose des problèmes en décharge continue. C'est le cas pour la dépôt de matériaux isolants qui, tôt ou tard, vont rendre les électrodes isolantes et interrompre la décharge. La cathode doit donc impérativement être conductrice pour permettre la circulation du courant.

I.B.b). Décharges en courant alternatif :

La tension d'entrée est supposée purement sinusoïdale (donc sans composante continue), de fréquence 13,56 MHz dans le cas de décharge RF (valeur utilisée dans l'industrie). Elle est appliquée avec ou sans capacité de liaison à une des électrodes (électrode RF). L'autre électrode est à un potentiel fixe (la masse). Une enceinte à vide, appelé réacteur, contient la structure des électrodes. Il est possible de régler la pression et le débit de gaz.

Le générateur permet de faire varier la tension appliquée aux électrodes (variation de puissance) à travers une boîte d'accord. Cette boîte sert à adapter l'impédance du plasma à l'impédance interne du générateur. L'adaptateur d'impédance est constitué d'un pont d'inductances et de capacités.

Un plasma est créé entre les électrodes. Il est limité de chaque coté par deux gaines (sheaths) dont la présence est en permanence nécessaire pour éviter qu'un flux trop fort d'électrons ne s'échappe du plasma. Le potentiel plasma V_p est tel que, à tout moment on ait :

$$V_p > 0 \quad \text{ou} \quad V_p > V(t) \tag{EqIB.1}$$

$V(t)$ est le potentiel de l'électrode RF.

La largeur des gaines vaut :

$$L_s = \sqrt{\frac{V \epsilon_0}{q N_e}} \sqrt{\frac{q V}{k T_e}} \tag{EqIB.2}$$

où V est la différence de potentiel plasma-électrode,
 k la constante de Boltzman,

$\epsilon_0 = 1/(36\pi) 10^{-9}$ F/m est la permittivité du vide,

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ eV la charge de l'électron,

N_e , T_e la concentration et la température qui correspond à l'énergie cinétique des électrons.

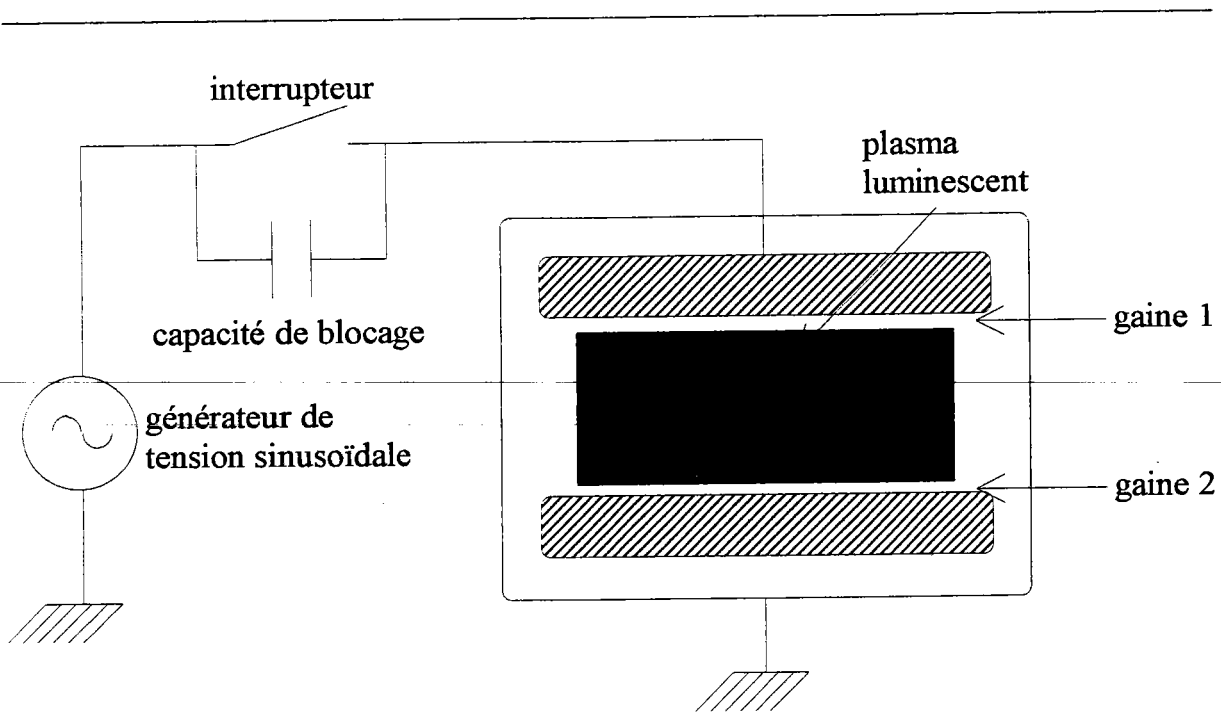


Fig.IB.2 : Décharges en courant alternatif.

I.B.b.1). Décharges Basse-Fréquence :

On a une décharge basse-fréquence si la fréquence F du générateur est inférieure ou égale à 50 kHz. La mobilité des ions est alors suffisante pour qu'ils aient le temps d'atteindre la cathode et de se comporter comme dans un système diode "DC", pendant chaque demi-période. Mais comme chaque électrode est alternativement cathode et anode, toutes les deux sont pulvérisées.

I.B.b.2). Décharges Radio-Fréquence :

On a une décharge Radio-Fréquence si la fréquence F du générateur est de 13,56 MHz. Ainsi, lors de l'alternance négative (demi-période I), la cathode attire les ions qui la pulvérise en la chargeant positivement. Lors de l'alternance positive (demi-période II), elle attire les électrons qui la décharge. Il est donc possible d'utiliser une cathode isolante puisqu'à chaque inversion de population elle est successivement chargée puis déchargée.

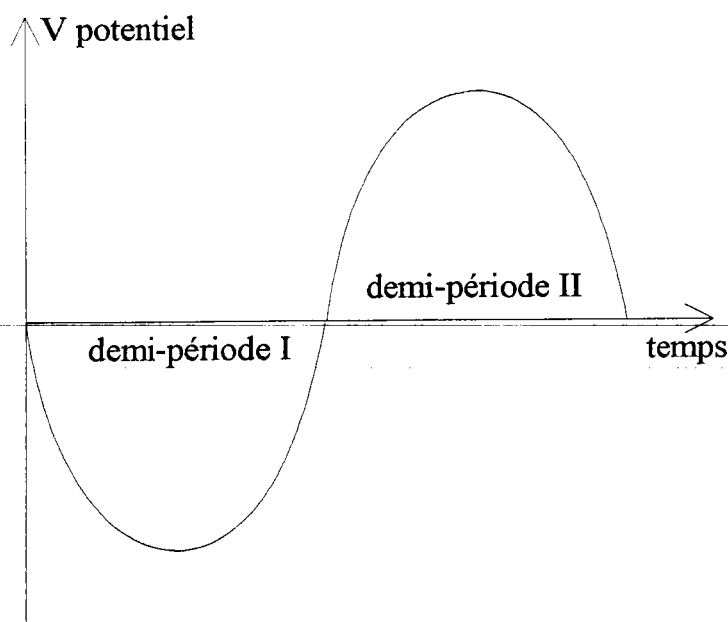


Fig.IB.3 : Décharge Radio-Fréquence.

Il se produit également un autre phénomène : lors de l'amorçage de la décharge (première demi-période positive du potentiel), un flux intense d'électrons est attiré vers la cathode alors que la deuxième demi-période n'attire que peu d'ions du fait de la faible mobilité des ions par rapport aux électrons. Aucune charge ne peut s'écouler dans la capacité donc l'électrode se porte à un potentiel négatif par rapport au plasma. Ce potentiel s'appelle potentiel d'autopolarisation. Ce potentiel permet au plasma de s'entretenir tout seul (le plasma est stable).

I.B.b.3). Décharges Hyper-Fréquence :

Les décharges hyper-fréquences sont également appelées décharges micro-ondes. Elles utilisent des fréquences comprises entre quelques centaines de MHz et quelques dizaines de GHz. Ce mode de décharge se caractérise par la quasi-immobilité des ions et des électrons par rapport aux oscillations du champ et seuls des effets collectifs sous l'action du champ moyen interviennent. Les problèmes technologiques posés sont ceux du couplage de l'énergie avec le plasma en utilisant divers systèmes d'antennes. Leur utilisation est aujourd'hui fréquente comme sources d'espèces excitées pour la gravure et le dépôt de matériaux.

I.C). Caractérisation d'un plasma :

Un plasma se caractérise par un certain nombre de paramètres auxquels une mesure par sonde de Langmuir nous permet d'avoir accès.

La sonde de Langmuir est une sonde électrostatique, utilisée depuis plus de 50 ans pour la caractérisation des plasmas. C'est un conducteur de petite dimension (sonde cylindrique, sphérique, plane) polarisé à une tension V_S et plongé dans un plasma. Ce conducteur recueille pour différentes valeurs V_S un courant I_S . De la courbe

caractéristique courant-tension $I_s = f(V_s)$, on déduit les paramètres électriques du plasma que l'on étudie sachant que :

$$V = V_s - V_p \quad (\text{EqIC.1})$$

Le potentiel est égal à la différence entre le potentiel de la sonde et le potentiel plasma. Le courant recueilli par la sonde est la somme algébrique des courants ionique et électronique.

$$I_s = |I_e| - I_i \quad (\text{EqIC.2})$$

Certains paramètres se déduisent de la caractéristique $I_s = f(V_s)$ du plasma.

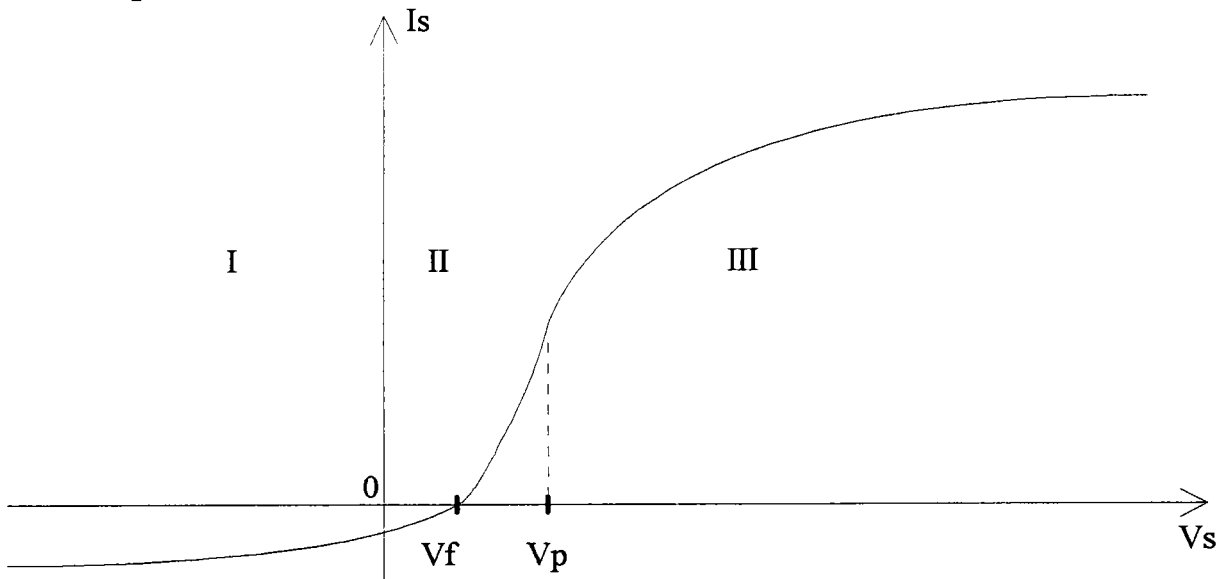


Fig.IC.1 : Caractéristique de sonde $I_s=f(V_s)$.

Cette courbe comporte trois parties :

I. Zone où V_s est très négatif : Le filament attire les ions du plasma. Le courant collecté par la sonde est très majoritairement ionique. Le courant électronique est négligeable. On appelle cette zone : branche ionique.

II. Zone intermédiaire : La polarisation est telle qu'elle attire une espèce sans totalement repousser l'autre. Le courant mesuré est la somme des courants ionique et électronique. Lorsque le flux d'ions et d'électrons arrivant sur le filament sont égaux, le courant collecté s'annule. Le potentiel correspondant à cette situation est appelé potentiel flottant V_f .

III. Zone où V_s est très positif : le filament attire les électrons du plasma. Le courant collecté par la sonde est très majoritairement électronique. Le courant ionique est négligeable. On appelle cette zone : branche électronique.

La transition entre la zone II et III correspond au potentiel plasma V_p .

Les paramètres obtenus grâce à la sonde de Langmuir peuvent être expliqués de la manière suivante :

- *Le potentiel flottant V_f (en volts)* : Un objet isolé, plongé dans un plasma, va collecter les charges de ce dernier sans pouvoir les écouler. Or les électrons sont plus mobiles que les ions. Donc, il se forme une densité superficielle de charges négatives à la surface de l'objet auquel correspond un certain potentiel négatif appelé potentiel flottant. Lorsqu'elle n'est pas polarisée, la sonde se fixe à ce potentiel. Sur la caractéristique $I_s = f(V)$, on peut lire la valeur V_f pour $I_s = 0$.

- *Le potentiel plasma V_p (en volts)* : Après la création du plasma, les électrons, mobiles, viennent se perdre sur les parois de l'enceinte. Pour compenser la perte de charges, les ions vont venir former une gaine ionique entre le plasma et les parois. Dans cette gaine, il existe un champ électrique correspondant à un potentiel positif appelé potentiel plasma. Ce dernier est situé au point d'inflexion de la caractéristique et peut facilement être obtenu par dérivation de la courbe $I_s = f(V)$.

- *La température électronique T_e (en eV)* : La différence $V_p - V_f$ est reliée à la température électronique par la relation :

$$V_p - V_f = \frac{T_e}{2} \cdot \ln\left(\frac{m_i}{2,3m_e}\right) = T_e \cdot \left(3,34 + \frac{1}{2} \ln(M_i)\right) \quad (\text{EqIC.3})$$

M_i est la masse des ions en Unité de Masse Atomique :

$$M_i [\text{UMA}] = 1,661 \cdot 10^{-27} \times m_i [\text{kg}]$$

T_e est la température électronique en eV, sachant que $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$.

On peut également déduire la température électronique dans la partie linéaire du graphe $\ln(I_e) = f(V_s)$:

$$T_e [eV] = \left(\frac{\Delta \ln |I_e(V_s)|}{\Delta V_s} \right)^{-1} \quad (\text{EqIC.4})$$

La température électronique est liée à l'énergie des électrons par la relation :

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT_e$$

(EqIC.5)

T_e est de l'ordre de quelques électrons-volts (25000 - 30000 K). Les ions et les atomes neutres, eux, sont presque à la température ambiante (300 K). Avec 1eV = 11600 K.

- *La densité électronique n_e (en cm^{-3}) :* La densité électronique apparaît comme très importante lorsque l'on veut caractériser un plasma. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, ce sont les électrons qui créent, puis stabilisent la décharge, grâce à leur grande mobilité et à leur faible charge. La densité électronique varie dans le même sens que la pression.

Ordre de grandeur :

$P = 1 \text{ mTorr}$	$n_e = 10^7 \text{ cm}^{-3}$
$P = 10 \text{ mTorr}$	$n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

La densité électronique s'obtient en connaissant la valeur T_e selon la formule suivante :

$$n_e = \sqrt{\frac{2 \pi m_e}{q^3 T_e}} \frac{I_p(V_p)}{S}$$

(EqIC.6)

$S = 2 \pi r_s l_s$ est la surface de la sonde (r_s est le rayon et l_s la longueur de la sonde),
 m_e est la masse de l'électron,
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$ sa charge,
 V_p est le potentiel plasma.

- *La longueur de Debye λ_D (en μm) :* On peut la définir comme le rayon de la sphère d'influence d'une particule chargée (la longueur critique à partir de laquelle une particule n'est plus influencée par sa voisine). C'est encore le rayon d'influence entre la particule et le filament. Si on observe un plasma avec une échelle supérieure à la longueur de Debye, on ne voit qu'un ensemble électriquement neutre. Par contre, si l'observation se fait avec une échelle inférieure à cette longueur, on distingue alors qu'une charge est entourée d'autres charges de signes opposés.

Calcul de la longueur de Debye :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 \cdot n_e}}$$

(EqIC.7)

avec :

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m,}$
$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K,}$
$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$

La longueur de Debye augmente lorsque la température électronique augmente. En effet, plus T_e est élevé, plus les électrons sont énergétiques, donc plus leur vitesse est élevée et leur zone d'influence augmente. La longueur de Debye varie également inversement avec la concentration électronique. Il paraît clair que si le nombre d'électron est important, le rayon de leur sphère d'influence sera plus petit, les électrons se faisant mutuellement écran.

- Le libre parcours moyen λ_m (en μm) : C'est la distance moyenne que parcourt une molécule avant d'en rencontrer une autre. Le libre parcours moyen dépend de la pression et de la température. Plus la pression est basse, plus le libre parcours moyen est grand.

Calcul du libre parcours moyen λ_m :

$$\lambda_m = \frac{kT_e}{\pi d^2 P \sqrt{2}}$$

(EqIC.8)

Le rapport λ_m / λ_D fixe l'importance des collisions dans la gaine :

Si $\lambda_m < \lambda_D$, la gaine entre la sonde et le plasma est collisionnelle.

Le rapport r_s / λ_D fixe l'épaisseur de la gaine :

Si $r_s < \lambda_D$, la gaine est épaisse.

Le rapport r_s / λ_m fixe l'effet perturbateur de la sonde sur la zone neutre :

Si $\lambda_m < r_s$, la sonde devient perturbatrice pour le plasma.

Selon la théorie choisie (Maxwell-Boltzman, Laframboise,...), les calculs des paramètres sont plus ou moins simples.

1.D). L'équipement de gravure :

Cette présente étude a été menée en étroite collaboration avec IBM Corbeil pour les aspects de validation, de répétabilité et d'intégration industrielle du système final. Le site de Corbeil -Essonnes (91) produit aujourd'hui des mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory) de 16 Moctets. Ces mémoires regroupent 20 millions de transistors sur une surface de 189mm^2 . Dans un futur proche, cette unité de production réalisera des mémoires de 64 Moctets (horizon 1997), puis rapidement des mémoires de 256 Moctets (1998).

Pour cela, l'usine de Corbeil utilise des outils de productions multi-réacteurs (appelés aussi "Clusters-Tools") comme par exemple la machine P5000 de Applied Material.

Cet outil comporte, en général, quatre chambres dont trois servent à la gravure par plasma. La figure, ci-dessous, indique la disposition des chambres de gravure.

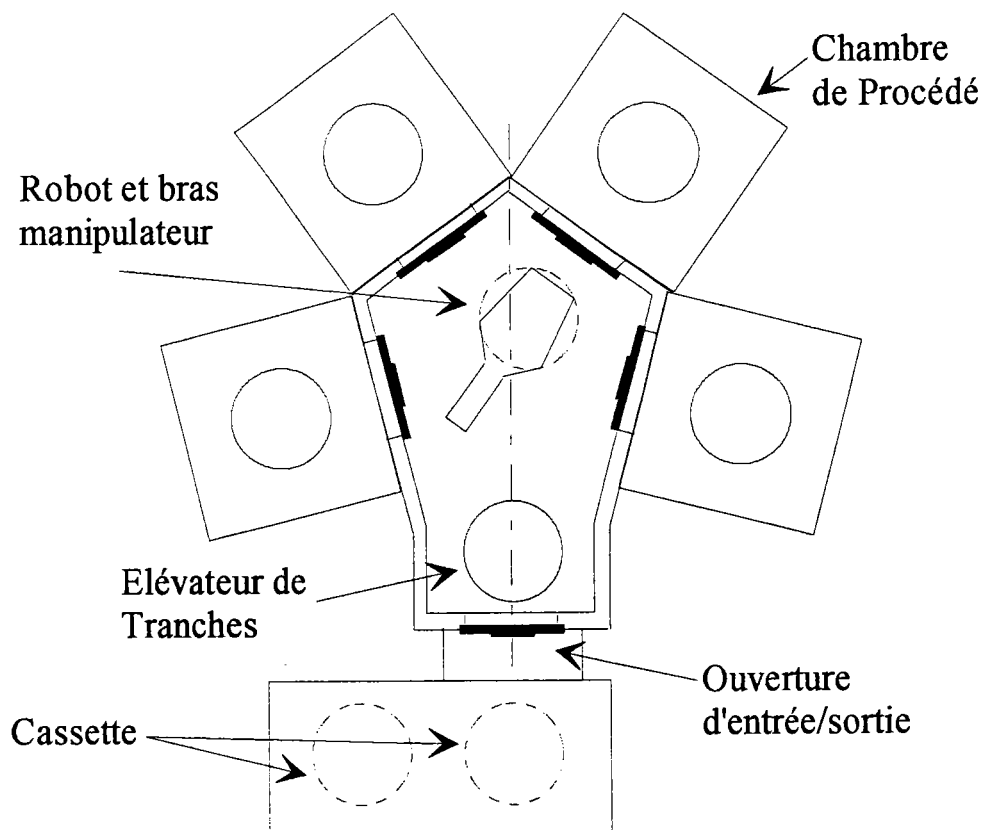


Fig.ID.1 : Exemple d'équipement multi-chambres P5000 (Applied Material).

Les tranches utilisées pour la fabrication du produit ont un diamètre de 200 mm. Un système de sas permet de charger et de décharger les tranches au moyen d'un bras mécanique sans que les chambres soient en contact avec l'extérieur. La tranche est chargée dans le support ("cassette handler"), la pression de la chambre de chargement ("loadlock chamber") est ramenée à la pression extérieure. La tranche est chargée dans

la chambre de chargement qui ramène alors sa pression à la pression de la chambre dans laquelle la tranche doit être chargée.

La partie réacteur et groupe de pompage se situe dans le couloir de maintenance alors que la partie commande est placée en salle "blanche" dite classe 10 (10 particules de poussières par unité de volume (Feet³)).

Les diverses commandes se font à l'aide d'un écran sur lequel les options sont sélectionnées par un crayon optique.

Les tranches sont rassemblées en lots de 25 tranches et chaque lot possède un numéro caractéristique.

Cette technologie de plus en plus précise et rigoureuse utilise les procédés plasma pour les nombreuses opérations de dépôt et de gravure.

1.E). Méthodes optiques de diagnostic et de contrôle des procédés :

Lorsque le film contrôlé est intégré dans une structure multidiélectrique complexe comme un circuit à haute intégration, la mesure initiale d'épaisseur est elle même soumise à erreur, car elle suppose la connaissance précise des caractéristiques optiques de toutes les sous couches et de la topographie. Il est alors difficile d'opérer par différence.

Parmi les méthodes optiques in situ, non intrusives, non destructives, sont proposées l'interférométrie, l'ellipsométrie, la diffractométrie, l'imagerie, que l'on peut utiliser seule ou couplée aux instruments d'une même ou d'une autre famille.

Pour des raisons d'encombrements, de caractéristiques mécaniques des chambres de gravures en ligne de production nous réduisons la présentation aux interféromètres à incidence normale.

Interféromètres simples :

L'interféromètre le plus simple utilise la lumière émise par le plasma comme source. Il est représenté dans la figure ci-dessous. La lumière réfléchi par la tranche est collectée par un système comprenant deux lentilles, un diaphragme, une fibre optique.

A la sortie de la fibre optique, un disperser fixe la longueur d'onde d'analyse et la bande passante.

Un photodétecteur permet de suivre l'intensité de la raie retenue en fonction du temps, pendant le déroulement du procédé.

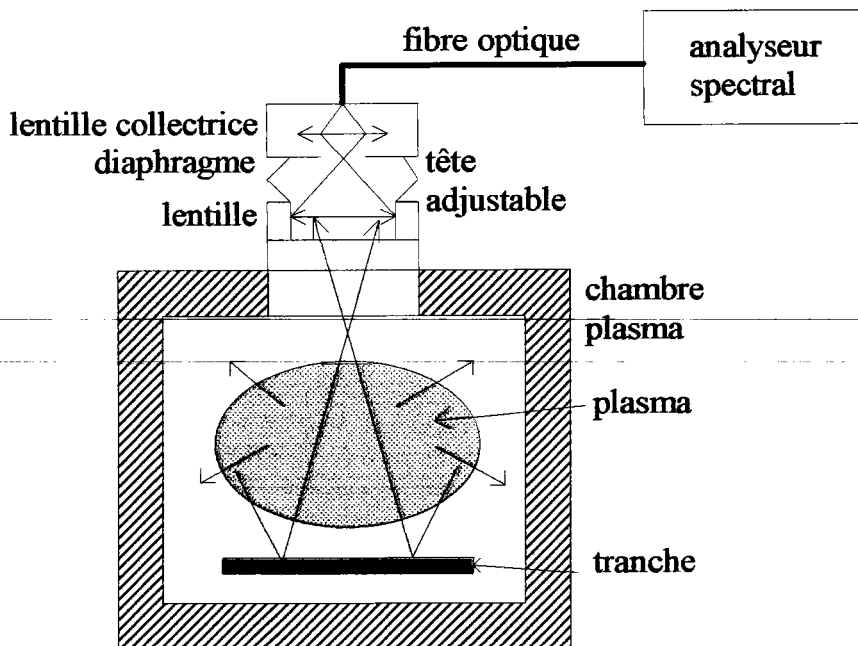


Fig.IE.1 : Interféromètre simple.

Les avantages du systèmes sont :

- les faibles coûts,
- les faibles encombrements,
- la source qui est polychromatique.

Les inconvénients du systèmes sont :

- la surface analysée est mal connue,
- on n'est pas maître de la source,
- les instabilités et les dérives des caractéristiques du plasma s'ajoutent aux autres difficultés.
- on regroupe ces difficultés au lieu de les séparer ce qui n'est généralement pas admis en production.

Pour s'affranchir de ces difficultés on utilise une source externe qui dispose d'un excellent rapport signal sur bruit, un laser. Le schéma n°2a montre un montage simple réalisé avec une diode laser.

Ce montage très usuel est utilisé pour la mesure des vitesses de dépôt ou de gravure. La détection des changements d'interface est mise en évidence soit par une variation de l'indice de réfraction, soit par une différence de la vitesse d'attaque, soit par les deux effets cumulés.

Toutefois, l'évolution des technologies et leur diversité font maintenant que cet appareil n'est pratiquement plus utilisé, car il manque de flexibilité.

Suivant l'application, le diamètre du faisceau est soit trop petit , soit trop large. On ne dispose actuellement que de longueurs d'onde élevées ($\lambda \geq 633\text{nm.}$) pour mesurer des films de plus en plus minces.

Interféromètre à faisceau étendu, polychromatique :

Lorsque les circuits étudiés sont constitués de structures répétitives, sur une surface suffisamment grande, on peut moyenner l'information reçue par le détecteur en utilisant un faisceau élargi par un jeu de lentilles. On étend les possibilités spectrales d'analyse en introduisant une lampe mercure basse pression dans le chemin optique du faisceau laser devant l'entrée du guide d'onde.

Le schéma 2b montre un montage simple et fiable qui donne d'excellents résultats en micro-électronique dans les conditions opératoires retenues.

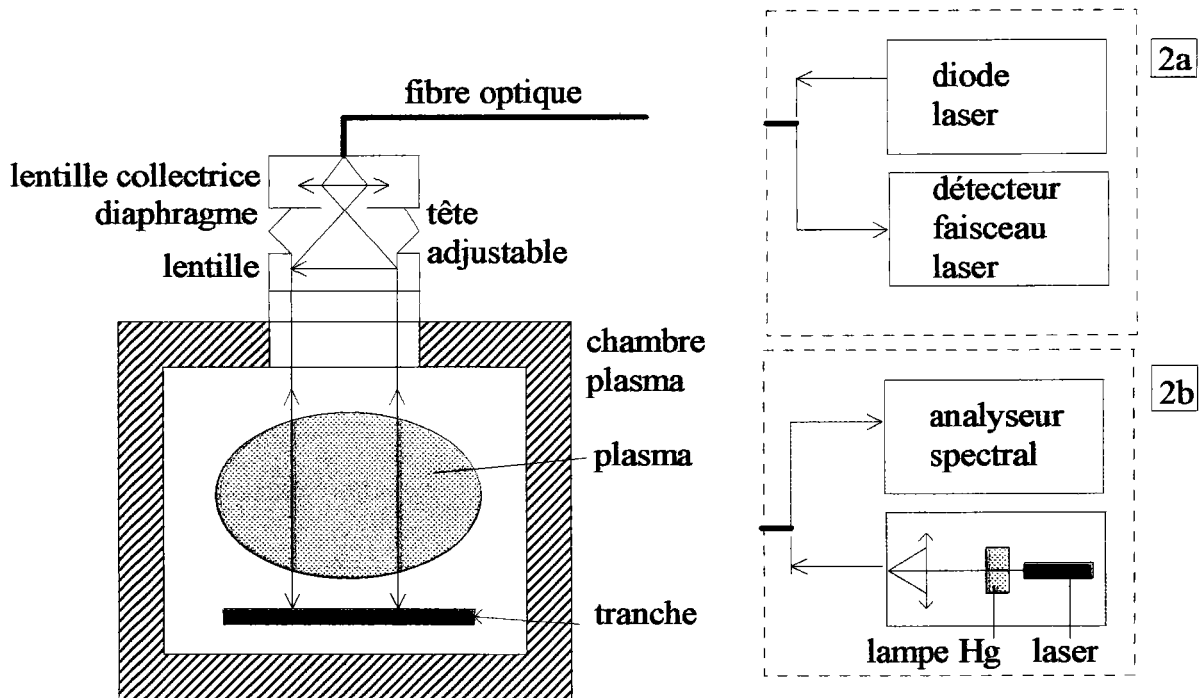


Fig.IE.2a et Fig.IE.2b : Interféromètre à faisceau étendu, polychromatique.

La limite de ce système apparaît cependant lorsque les empilements multidiélectriques placés sous le faisceau ont une topographie complexe.

Le signal réfléchi intègre la somme de toutes les modulations. Il donne un enregistrement de forme compliquée et qui plus est non reproductible d'un échantillon à un autre. La non reproductibilité est liée, pour l'essentiel, aux dispersions des mesures, des caractéristiques géométriques et optiques des multiples empilements incontournables en fabrication.

Pour simplifier l'analyse, il faut être sélectif, c'est-à-dire se situer sur un site spécifique représentatif si possible d'une seule structure. Le problème est ensuite de savoir repositionner, sans ambiguïté, le faisceau incident à chaque essai.

On y parvient en associant à l'interféromètre un système d'éclairage du site et une caméra permettant de le voir.

Nous avons donc à concevoir et à réaliser un montage expérimental, qui permette la validation et l'évaluation rapide de la qualité des mesures. Pour une large part, ce montage intégrera des sous-ensembles (matériel et logiciel), si possible disponibles sur le marché.

Ainsi, nous avons à :

-Réaliser un capteur combinant l'imagerie et l'interférométrie à une ou plusieurs longueurs d'onde pour assurer in-situ et en temps réel un contrôle dimensionnel (X, Y, Z), pendant la fabrication de microsystèmes.

-Evaluer et modifier le produit en collaboration avec des fabricants de microsystèmes en vue de son industrialisation.

Pour cela, nous avons découpé cette étude en deux parties :

L'objectif de la première partie de l'étude vise à montrer que l'interférométrie optique sous incidence normale offre une possibilité d'arrêter une gravure sur une épaisseur restante, sans une mesure préalable de l'épaisseur initiale, pour chaque échantillon.

Le programme de travail de la première partie comporte trois phases :

Phase 1 : L'étude préalable et la mise en oeuvre de la barrette de photodiodes tant hardware que software.

Phase 2 : La réalisation de l'interface d'acquisition intégrant le domaine d'application.

Phase 3 : Le test en ligne du produit dans une véritable ligne de production de tranches.

La seconde partie traite de la réalisation du système de mesure dimensionnelle d'empilement diélectrique. Le programme de travail de la seconde partie comporte quatre phases :

Phase 1 : Etude théorique et conception d'un montage expérimental sur table, comprenant la définition du montage optique, l'électronique de saisie, les dispositifs de positionnement et d'alignement seront manuels.

Phase 2 : Interprétation des mesures physiques, développement logiciel des mesures en temps réel des épaisseurs (spectre cannelé), programme de calcul et d'analyse des données

Phase 3 : Validation des principes et évaluation des performances en relations avec des fabricants de microsystèmes et d'équipements. Réalisation de l'instrument, positionnement motorisé.

Phase 4 : Intégration de la mémorisation et du traitement d'image. Validation des performances en terme de précision, reproductibilité et adéquation de l'instrument aux besoins de nos partenaires.

Chapitre II

ASPECTS THÉORIQUES

Un rappel sur les ondes électromagnétiques et les interférences de deux faisceaux lumineux sont faits en premier lieu [12][13]. Nous abordons ensuite les réflexions multiples d'un faisceau lumineux monochromatique sur des surfaces parallèles à l'aide du formalisme d'Abelès [1][10]. Les équations obtenues permettent de calculer le flux réfléchi pour chaque longueur d'onde. Le spectre obtenu, qui présente des maxima et des minima est pour cette raison appelé spectre canelé. A partir de formalisme, nous avons réalisé un programme de simulation pour l'étude de la réflexion d'un rayon lumineux sur des couches de nature et d'épaisseur différentes.

II.A). Propriétés optiques des systèmes multicouches

- Les ondes électromagnétiques :

Pour une onde électromagnétique, les vecteurs champ électrique \vec{E} et champ d'induction magnétique \vec{B} se propagent simultanément, avec la même vitesse, et en restant perpendiculaires l'un à l'autre. De plus, ils sont perpendiculaires à la direction de propagation : l'onde est dite transversale.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

(EqIIA.1)

avec, entre les modules, la loi $E_0 = vB_0$ ou sous forme vectorielle $\vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B}$.

\vec{k} étant le vecteur d'onde dont le module est égal à la constante de propagation et \vec{r} le rayon vecteur dont l'extrémité représente le point où la perturbation est étudiée.

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

vitesse de la lumière dans le vide
perméabilité du vide (constant dans le système S.I.)

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m.}$$

permittivité du vide.

v : vitesse de la lumière dans le milieu transparent (diélectrique) d'indice de réfraction n .

$$v = c/n.$$

Energie d'une onde électromagnétique :

Nous utiliserons le résultat de la théorie électromagnétique, qui dit que le flux transporté par une onde est donné par le flux du vecteur de Poynting.

$$\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H} \quad (\text{EqIIA.2})$$

Où \vec{H} est le champ magnétique (en Ampère / mètre) relié, dans un milieu non magnétique, au champ d'induction magnétique \vec{B} (en Tesla) par la loi

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{EqIIA.3})$$

soit avec $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$

$$\vec{B} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \vec{H} \quad (\text{EqIIA.4})$$

Le vecteur \vec{S} est dirigé selon la direction de propagation de l'onde, donc perpendiculaire à \vec{E} et \vec{H} puisque l'onde est transversale. Son module est appelé: débit d'énergie, c'est-à-dire l'énergie, qui, par unité de temps, traverse une surface unité perpendiculaire à la direction de propagation. En utilisant la relation $E = vB$, on obtient pour la valeur du flux d'énergie :

$$S = EH = E \frac{B}{\mu_0} = \frac{E^2}{v\mu_0} = \frac{E^2}{v} \epsilon_0 c^2 = \epsilon_0 n c E^2 \quad (\text{EqIIA.5})$$

La fréquence des ondes lumineuses étant très élevée, la période correspondante est beaucoup plus courte que le temps de réponse des détecteurs pratiquement utilisés. On appelle quelquefois "intensité" la valeur moyenne temporelle de \vec{S} qui n'a rien à voir avec l'intensité d'une source telle que l'a définie la photométrie. Pour éviter toute ambiguïté, nous utiliserons le terme de puissance plutôt que intensité.

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S dt \quad (\text{EqIIA.6})$$

Ce qui s'écrit souvent :

$$I = \langle S \rangle = \varepsilon_0 n c \langle E^2 \rangle = \varepsilon_0 n c E_0^2 \langle \sin^2(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \rangle \quad (\text{EqIIA.7})$$

La valeur moyenne de \sin^2 , calculée sur un grand intervalle de temps (ou sur une période) vaut 1/2. Il en résulte que :

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 n c E_0^2 \quad (\text{EqIIA.8})$$

L'expression précédente donne la valeur du flux d'énergie, c'est à dire l'énergie qui, par unité de temps, traverse la surface unité perpendiculaire à la direction de propagation. On peut donc considérer que c'est le produit de la vitesse par l'énergie contenue dans l'unité de volume, aussi appelée densité d'énergie u :

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 n^2 E_0^2 \quad (\text{EqIIA.9})$$

Par la suite, nous identifierons la puissance d'une onde au carré de son amplitude, sans écrire la constante de proportionnalité donnée par la théorie électromagnétique :

$$I = E_0^2 \quad (\text{EqIIA.10})$$

De plus, il est essentiel de se rappeler qu'il s'agit du résultat du calcul d'une moyenne temporelle.

Interférences de deux faisceaux lumineux :

Nous allons considérer la superposition de deux faisceaux lumineux en tenant compte de leurs propriétés vectorielles. Les fréquences sont identiques, mais les directions des vecteurs d'ondes \vec{k}_1 et \vec{k}_2 peuvent être différents. Le point où l'on considère l'onde est repéré par son rayon vecteur \vec{r} . Si les ondes sont planes on aura :

$$\begin{aligned}
\vec{E}_1 &= \vec{E}_{01} \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \vec{\delta}_1) \\
\vec{E}_2 &= \vec{E}_{02} \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \vec{\delta}_2) \\
\text{avec } \vec{\delta}_1 &= (\delta_{1x}, \delta_{1y}, \delta_{1z}) \\
\vec{\delta}_2 &= (\delta_{2x}, \delta_{2y}, \delta_{2z})
\end{aligned}
\tag{EqIIA.11}$$

\vec{E}_{01} et \vec{E}_{02} ne sont pas nécessairement parallèles. On suppose en plus que l'extrémité des vecteurs champ électrique, considérée en un point de l'espace, se déplace sur une droite en fonction du temps. On dit alors que l'onde est à polarisation rectiligne, ce qui entraîne :

$$\begin{aligned}
\delta_{1x} &= \delta_{1y} = \delta_{1z} = \delta_1 \\
\delta_{2x} &= \delta_{2y} = \delta_{2z} = \delta_2
\end{aligned}
\tag{EqIIA.12}$$

L'onde résultante sera donnée par la moyenne temporelle de :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2
\tag{EqIIA.13}$$

c'est à dire, en admettant qu'on est dans le vide :

$$\begin{aligned}
I &= \varepsilon_0 c \langle \vec{E}^2 \rangle \\
I &= \varepsilon_0 c \langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \rangle \\
I &= \varepsilon_0 c \langle \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \varepsilon_0 c (\langle \vec{E}_1^2 \rangle + \langle \vec{E}_2^2 \rangle + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle) \\
I &= I_1 + I_2 + I_{12} \\
\text{avec } I_1 &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{01}^2 \\
I_2 &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{02}^2
\end{aligned}
\tag{EqIIA.14}$$

Pour obtenir l'expression de I_{12} évaluons :

$$\begin{aligned}
\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \delta_1) \cos(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \delta_2) \\
\text{posons } \alpha &= -\vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \delta_1 \\
\beta &= -\vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \delta_2 \\
\text{alors } \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\omega t + \alpha) \cos(\omega t + \beta)
\end{aligned}
\tag{EqIIA.15}$$

la moyenne temporelle devient :

$$\begin{aligned}\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \langle [(\cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha) \cdot (\cos \omega t \cos \beta - \sin \omega t \sin \beta)] \rangle \\ \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \left[\langle \cos^2 \omega t \rangle \cos \alpha \cos \beta + \langle \sin^2 \omega t \rangle \sin \alpha \sin \beta \right. \\ &\quad \left. + (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle \right]\end{aligned}$$

(EqIIA.16)

Un calcul simple montre que

$$\begin{aligned}\langle \cos^2 \omega t \rangle &= \frac{1}{2} \\ \langle \sin^2 \omega t \rangle &= \frac{1}{2} \\ \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle &= 0\end{aligned}$$

(EqIIA.17)

Il en résulte que :

$$\begin{aligned}\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\alpha - \beta) \\ \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos\left[-(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + (\delta_1 - \delta_2)\right] \\ \text{posons } \varphi &= -(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + (\delta_1 - \delta_2) \\ \text{et } I_{12} &= \varepsilon_0 c \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \varphi\end{aligned}$$

(EqIIA.18)

remarquons que si les vecteurs champ électrique sont perpendiculaires, leur produit scalaire est nul et les interférences ne se produisent pas. Un cas plus intéressant est celui où \vec{E}_{01} est parallèle à \vec{E}_{02} , ce qui entraîne :

$$\begin{aligned}I_{12} &= 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \\ I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi\end{aligned}$$

(EqIIA.19)

Les valeurs maximum et minimum au voisinage d'un point sont :

$$\begin{aligned}
 I_{\min} &= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \\
 I_{\max} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}
 \end{aligned}
 \tag{EqIIA.20}$$

Le contraste se définit par :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}
 \tag{EqIIA.21}$$

Dans le cas où $I_1 = I_2$, la formule des interférences prend la forme simple:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}
 \tag{EqIIA.22}$$

C'est le cas le plus intéressant car $I_{\min} = 0$ et par conséquent le contraste est égal à l'unité.

Différence de marche :

Considérons une onde progressive se propageant selon Ox :

$$\begin{aligned}
 \vec{E} &= \vec{E}_0 \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = \vec{E}_0 \sin(\omega t - kx) \\
 \text{avec } k &= \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda_m}
 \end{aligned}
 \tag{EqIIA.23}$$

La longueur d'onde λ_m qui figure dans cette expression est celle qui existe dans le milieu matériel considérée, où la lumière se propage avec la vitesse $v < c$. En optique, on préfère travailler avec les longueurs d'onde λ dans le vide. Si c est la vitesse de la lumière dans le vide, l'indice de réfraction est tel que $v = c / n$. et $\lambda = n \lambda_m$.

On peut ainsi écrire

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin\omega\left(t - \frac{nx}{c}\right) = \vec{E}_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} nx\right)
 \tag{EqIIA.24}$$

La quantité $L = nx$ qui apparaît dans ces expressions est le chemin optique. C'est la distance que parcourerait la lumière dans le vide pendant le temps qu'elle met à parcourir la distance x dans le milieu matériel.

On peut désormais écrire :

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \vec{E}_{01} \sin(\omega t - k_1 x + \delta_1) \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_{02} \sin(\omega t - k_2 x + \delta_2)\end{aligned}\tag{EqIIA.25}$$

La différence de phase φ entre deux ondes \vec{E}_1 et \vec{E}_2 peut alors s'exprimer en fonction de la différence de marche Δ et de la longueur d'onde dans le vide λ :

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda}(L_1 - L_2) - (\delta_1 - \delta_2) \\ \varphi &= \frac{2\pi}{\lambda}\Delta\end{aligned}\tag{EqIIA.26}$$

Très souvent on peut poser $\delta_1 = \delta_2$ et la différence de marche est simplement la différence de chemins optiques.

Réflexions multiples sur des surfaces à faces parallèles :

Ce paragraphe va nous permettre d'établir les équations générales pour le calcul de la réflectance en fonction de différents paramètres pratiques. Les équations de départ, qui décrivent la propagation des champs électriques et magnétiques dans les couches minces, sont les équations de Maxwell. L'annexe A en présente un rappel.

Les interférences se produisent entre les rayons réfléchis respectivement par la face supérieure et par la face inférieure de la lame d'épaisseur d et d'indice de réfraction n . On sait qu'une réflexion sur une surface séparant un milieu d'indice faible et un milieu d'indice plus élevé se traduit par une différence de phase supplémentaire de π , ou d'une manière équivalente par une différence de marche de $\lambda/2$.

Si on admet que l'indice de réfraction du substrat est inférieur à celui du film c'est à dire $n_s < n$, alors la différence de marche entre les rayons s'écrit en considérant les surfaces d'onde en I et K :

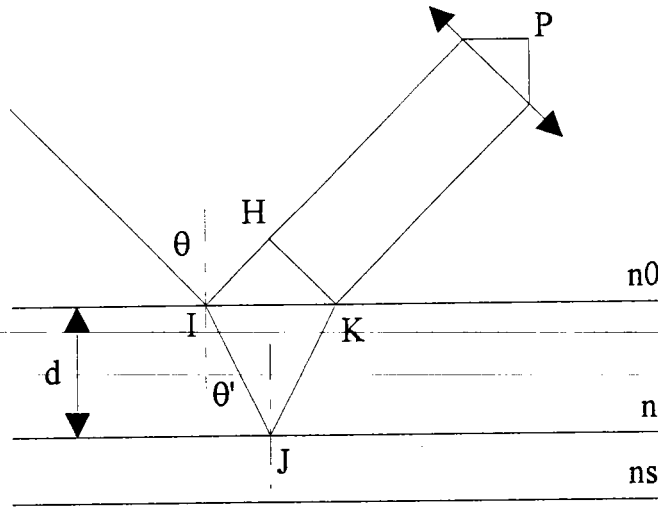


Fig.IIA.1: Interférences de lames à faces parallèles.

$$\Delta = 2nIJ - IH + \frac{\lambda}{2}$$

$$IJ = \frac{d}{\cos \theta'}$$

$$IH = IK \sin \theta = 2d \tan \theta' \sin \theta = 2d \frac{\sin \theta'}{\cos \theta'} n \sin \theta'$$

(EqIIA.27)

d'où la différence de marche :

$$\Delta = 2n \frac{d}{\cos \theta'} - 2d \frac{\sin \theta'}{\cos \theta'} n \sin \theta' + \frac{\lambda}{2} = 2nd \left(\frac{1 - \sin^2 \theta'}{\cos \theta'} \right) + \frac{\lambda}{2}$$

(EqIIA.28)

Plus communément connu sous la forme :

$$\Delta = 2nd \cos \theta' + \frac{\lambda}{2}$$

(EqIIA.29)

L'ordre d'interférence p permet d'exprimer la différence de marche avec pour unité la longueur d'onde.

$$p = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2nd \cos \theta'}{\lambda} + \frac{1}{2}$$

(EqIIA.30)

II.B). Détermination de l'épaisseur :

II.B.1). Méthodes optiques de détermination de l'épaisseur d'une couche transparente sur un empilement.

La réflectométrie et l'interférométrie à une longueur d'onde ne mesurent que des variations d'épaisseur sur la première couche. La mesure absolue de cette dernière n'est pas accessible, car la périodicité de la réflectance en fonction de l'épaisseur donne des solutions multiples, pour une longueur d'onde. Par contre, la mesure du spectre de réflectance permet le calcul des épaisseurs.

Les équations non linéaires entre l'épaisseur et la réflectance ne permettent pas l'utilisation de méthodes de calculs simples. Les lignes qui suivent présentent deux techniques, mais il en existe d'autres [16].

II.B.1.1) Principe de l'interférométrie spectroscopique :

Le principe de mesure de l'interférométrie spectroscopique est basée sur la superposition des rayons réfléchis par les faces parallèles d'un film transparent en fonction des longueurs d'onde λ .

II.B.1.1.1). La méthode des extrema :

Cette méthode ne peut être utilisée que :

- Si le système ne comporte qu'une seule couche. La présence de plusieurs couches amène un phénomène de battement, dû à la surperposition des sinusoïdes relatives à chaque couche.
- Si le spectre présente un nombre minimum d'extrema pour permettre le calcul (au moins deux).

Le traitement commence par l'identification des longueurs d'onde pour lesquelles le spectre présente un extremum en utilisant une interpolation avec un lissage parabolique. Soit m le nombre d'extrema trouvé, il doit être supérieur à 2 pour que le calcul soit possible. Avec une incidence normale et pour une épaisseur donnée d de la couche, la longueur d'onde est liée aux extrema par la relation :

$$k\pi = \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \tag{EqIIB.1}$$

avec k entier. Soit n et n_s les indices de réfraction respectifs de la couche et du substrat.

- Si $n > n_s$, les minima du spectre correspondent aux valeurs paires de k .

- Si $n < n_S$, les minima du spectre correspondent aux valeurs impaires de k .

On calcule l'épaisseur d_k à partir des longueurs d'onde des extrema :

$$d_k = \frac{(i+k)\lambda_{m-k}}{4n(\lambda_{m-k})} \quad (\text{EqIIB.2})$$

avec $0 \leq k \leq m-1$

i est un entier dont la valeur initiale (1 ou 2) est déterminé suivant les critères suivants:

- Le dernier extrema trouvé est un minimum et $n > n_S$, alors $i=2$
- Le dernier extrema trouvé est un minimum et $n < n_S$, alors $i=1$
- Le dernier extrema trouvé est un maximum et $n > n_S$ alors $i=1$
- Le dernier extrema trouvé est un maximum et $n < n_S$, alors $i=2$

On détermine la moyenne des épaisseurs calculées d_m et on calcule la variance normalisée :

$$\langle \sigma^2 \rangle = \frac{1}{m-1} \sum_{k=0}^{m-1} \left(\frac{d_k}{\bar{d}} \right)^2 \quad (\text{EqIIB.3})$$

i est incrémenté par pas de 2 jusqu'à ce que σ^2 soit minimum et \bar{d} représente alors l'épaisseur de la couche.

L'analyse de la variance est plus robuste que le calcul à partir du premier et du dernier extremum car elle fournit un critère de qualité de la mesure.

II.B.1.1.2). Méthode d'optimisation par l'algorithme de Levenberg-Marquardt :

Cette méthode est utilisée pour résoudre des équations non linéaires [3]. Elle est dérivée de la méthode du gradient. On recherche les paramètres a_j de la fonction $y(x, \vec{a})$, prise comme modèle, qui minimisent la somme des carrés des écarts $\chi^2(\vec{a})$ entre les points mesurés (x_i, y_i) et leurs valeurs calculées au point x_i à l'aide de la fonction:

$$\chi^2(\vec{a}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y(x_i, \vec{a})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (\text{EqIIB.4})$$

\vec{a} est le vecteur des variables recherchées. La variation des paramètres est gérée à l'aide du gradient de la fonction calculée avec les nouvelles valeurs des variables jusqu'à ce que la somme des carrés des écarts soit inférieure à un seuil, choisi en fonction de la précision recherchée. Pour notre cas le formalisme d'Abelès permet le calcul de la réflectance en fonction des épaisseurs des couches constituées de matériaux connus. Les dérivées sont calculées numériquement à chaque itération. Le calcul se termine lorsque la somme des carrés des écarts est inférieure à un seuil fixé par l'utilisateur.

L'inconvénient de cette méthode est la nécessité de donner une valeur initiale proche de la solution si la fonction $\chi^2(\vec{a})$ présente des minima secondaires, ce qui est notre cas. Cette évaluation de la solution est plus critique si la fonction présente des solutions multiples.

En général, les ordres de grandeur sont connus et la valeur précise est déterminée par le calcul. Une détermination grossière, si cela est possible, peut être faite par la méthode des minima. Le spectre périodique introduit en plus des solutions multiples si plusieurs paramètres sont à calculer.

II.B.2). Modélisation des systèmes à une couche sur un substrat absorbant

- Formalisme d'Abelès.

Considérons un film transparent . On veut calculer le champ électrique et magnétique à l'interface d'entrée (a) en fonction de ses valeurs à l'interface de sortie (b). Comme les équations sont linéaires, on peut écrire la relation sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ H_b \end{bmatrix}$$

(EqIIB.5)

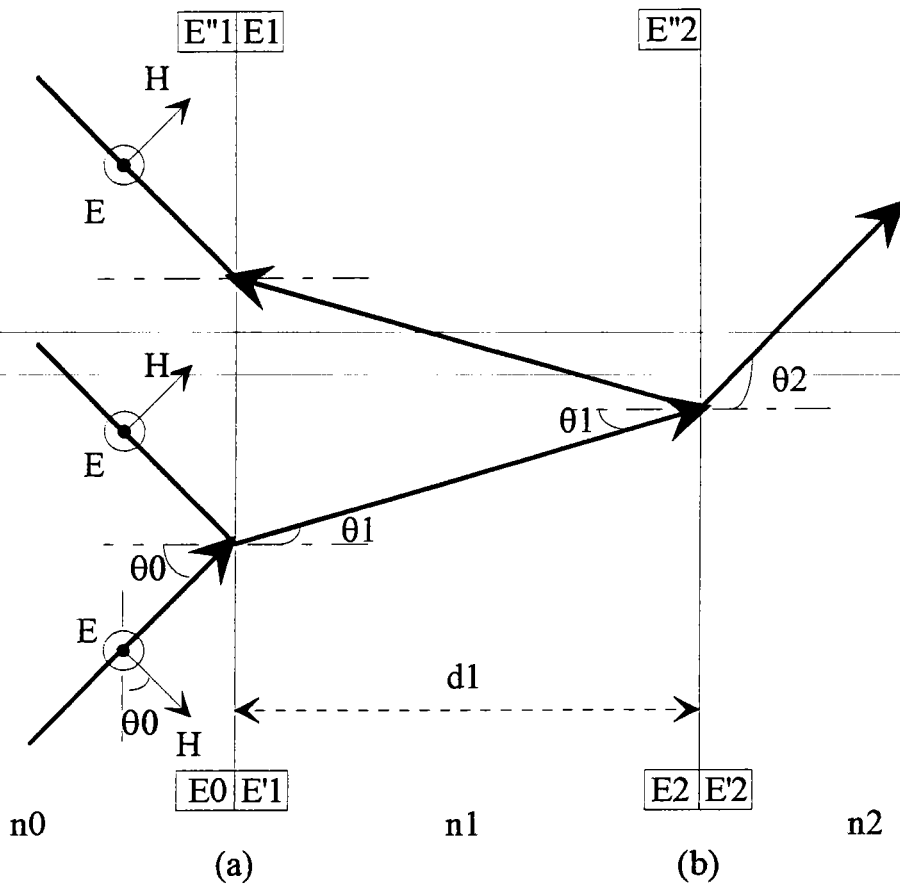


Fig.IIB.1 : Formalisme matriciel d'Abelès.

Pour obtenir les éléments $m_{i,j}$, on écrit la continuité des composantes tangentielles de \vec{E} et \vec{H} de part et d'autre des interfaces (a) et (b). La figure, ci-dessus, est simplifiée en ce sens que E_0 représente l'onde incidente E''_1 représente la somme de toutes les ondes qui, après réflexion multiples, se dirigent de la face (a) vers la gauche, E_1 est la somme de toutes les ondes incidentes sur le côté droit de la face (a) après réflexion sur la face (b), E'_2 est la somme de toutes les ondes qui quittent la face (b) en se dirigeant vers la droite etc..... .

Au niveau de chaque interface la continuité de \vec{E} et de \vec{H} entraîne \vec{E} perpendiculaire au plan d'incidence.

$$\begin{aligned}
 E_a &= E_0 + E''_1 = E'_1 + E_1 \\
 E_b &= E_2 + E''_2 = E'_2 \\
 H_a &= H_0 \cos \theta_0 - H''_1 \cos \theta_0 = H'_1 \cos \theta_1 - H_1 \cos \theta_1 \\
 H_b &= H_2 \cos \theta_1 - H''_2 \cos \theta_1 = H'_2 \cos \theta_2
 \end{aligned}
 \tag{EqIIB.6}$$

$$H = n \sqrt{\frac{\xi_0}{\mu_a}} E$$

(EqIIB.7)

pour un milieu non magnétique.

$$H_a = (E_0 - E_1') n_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_0 = (E_1' - E_1) n_1 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_1$$

$$H_b = (E_2 - E_2') n_1 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_1 = E_2 n_2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_2$$

(EqIIB.8)

posons :

$$\gamma_0 = n_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_0 \quad \gamma_1 = n_1 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_1 \quad \gamma_2 = n_2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_2$$

(EqIIB.9)

en remplaçant, on obtient avec $E_1' = rE_0$ et $E_2' = tE_0$

$$\begin{bmatrix} E_0 + rE_0 \\ \gamma_0(E_0 - rE_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} tE_0 \\ \gamma_2 tE_0 \end{bmatrix}$$

(EqIIB.10)

r et t étant respectivement les coefficients de réflexion et de transmission globaux, pour l'amplitude. On en déduit :

$$1 + r = m_{11}t + m_{12}\gamma_2t$$

$$\gamma_0(1 - r) = m_{21}t + m_{22}\gamma_2t$$

(EqIIB.11)

Il en résulte que :

$$r = \frac{E_1''}{E_0} = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} - m_{21} - \gamma_2 m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} + m_{21} + m_{21} + \gamma_2 m_{22}}$$

$$t = \frac{E_2'}{E_0} = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} + m_{21} + m_{21} + \gamma_2 m_{22}}$$

(EqIIB.12)

Il reste à calculer explicitement les $m_{i,j}$. La propagation dans la couche introduit un facteur de phase :

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1 \quad (\text{EqIIB.13})$$

et par conséquent :

$$\begin{aligned} E_2 &= E_1' e^{-i\delta_1} \\ E_1 &= E_2'' e^{-i\delta_1} \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.14})$$

La première expression traduit la propagation de la gauche vers la droite, la seconde de la droite vers la gauche. On peut ainsi éliminer E_2 et E_2'' dans les expressions de E_b et H_b :

$$\begin{aligned} E_b &= E_1' e^{-i\delta_1} + E_1 e^{-i\delta_1} = E_2' \\ H_b &= E_1' e^{-i\delta_1} - E_1 e^{-i\delta_1} = E_2' \gamma_2 \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.15})$$

Résolvons par rapport à E_1' et E_1 . Pour cela, on peut multiplier la première équation par γ_1 , puis additionner et soustraire membre à membre :

$$\begin{aligned} E_1' &= \frac{\gamma_1 E_b + H_b}{2\gamma_1} e^{+i\delta_1} \\ E_1 &= \frac{\gamma_1 E_b - H_b}{2\gamma_1} e^{-i\delta_1} \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.16})$$

$$\begin{aligned} E_a &= E_1' + E_1 = E_b \cos \delta_1 + H_b \frac{i \sin \delta_1}{\gamma_1} \\ H_a &= (E_1' - E_1) \gamma_1 = E_b (i \gamma_1 \sin \delta_1) + H_b \cos \delta_1 \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.17})$$

On obtient ainsi :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\gamma_1} \\ i \gamma_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ H_b \end{bmatrix} \quad (\text{EqIIB.18})$$

Avec N couches on aura de proche en proche :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_N \begin{bmatrix} E_b \\ H_b \end{bmatrix} \quad (\text{EqIIB.19})$$

Remarque 1: Le calcul a été fait pour la polarisation s c'est à dire \vec{E} perpendiculaire au plan d'incidence. Pour la polarisation p, le calcul est analogue en prenant pour équations de départ :

$$\begin{aligned} E_a &= E_0 \cos \theta_0 - E_1'' \cos \theta_0 = E_1' \cos \theta_1 - E_1 \cos \theta_1 \\ E_b &= E_2 \cos \theta_1 - E_2'' \cos \theta_1 = E_2' \cos \theta_2 \\ H_a &= H_0 + H_1'' = H_1' + H_1 \\ H_b &= H_2 + H_2'' = H_2' \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.20})$$

on pose :

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \frac{n_i}{\cos \theta_i}} \quad (\text{EqIIB.21})$$

et on obtient :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\gamma_1} \\ i \gamma_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ H_b \end{bmatrix} \quad (\text{EqIIB.22})$$

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{E_1''}{E_0} = - \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} - m_{21} - \gamma_2 m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} + m_{21} + m_{21} + \gamma_2 m_{22}} \\ t_p &= \frac{E_2'}{E_0} = \frac{n_0}{n_2} \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_2 m_{12} + m_{21} + m_{21} + \gamma_2 m_{22}} \end{aligned} \quad (\text{EqIIB.23})$$

En résumé, on obtient la même matrice de transfert avec :

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 \cos \theta_1 \quad \text{pour } \vec{E} \perp P.I \quad (\text{EqIIB.24})$$

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n_1}{\cos \theta_1} \quad \text{pour } \vec{E} // P.I \quad (\text{EqIIB.25})$$

Remarque 2 : La matrice de transfert pour une couche d'épaisseur nulle est égale à la matrice identité, qui est un élément neutre pour la multiplication matricielle. Ce résultat permet de calculer la réflectance d'un substrat seul en faisant l'hypothèse qu'il est recouvert d'une couche d'épaisseur nulle. Ce qui donne :

$$r_s = \frac{\gamma_0 - \gamma_2}{\gamma_0 + \gamma_2} = \frac{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_2 \cos \theta_2} \quad (\text{EqIIB.26})$$

C'est une des formules de Fresnel, pour une incidence normale on obtient:

$$R = \left(\frac{\tilde{n}_0 - \tilde{n}_2}{\tilde{n}_0 + \tilde{n}_2} \right)^2 \quad (\text{EqIIB.27})$$

On a maintenant tous les éléments pour calculer les expressions des coefficients de réflexion et de transmission pour un système à une ou plusieurs couches. Les réflectances sont :

$$R_p = r_p \cdot r_p^* \quad (\text{EqIIB.28})$$

$$R_s = r_s \cdot r_s^* \quad (\text{EqIIB.29})$$

A l'incidence normale $\cos \theta_1 = 1$ et $R_p = R_s$. Pour une incidence oblique, il faut calculer séparément R_p et R_s . Si la lumière incidente est naturelle (non polarisée), on prendra :

$$R = \frac{1}{2} (R_p + R_s) \quad (\text{EqIIB.30})$$

Si on éclaire une ou des couches minces à faces parallèles par de la lumière blanche, chacune des radiations monochromatiques fournit un système de franges, localisées à l'infini, d'autant plus écartées que la longueur d'onde est grande. Le rayon réfléchi composé de ces radiations, donne naissance à une teinte dite "blanc d'ordre supérieur". Son analyse en un point de la surface, à l'aide d'un système dispersif, révèle

un spectre cannelé. Celui-ci représente le flux lumineux réfléchi en fonction de la longueur d'onde pour un empilement donné. La matrice de transfert de chaque couche est constituée d'éléments, qui sont chacun une fonction sinusoïdale du facteur de phase δ_i :

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i(\lambda) d_i \cos \theta_i$$

(EqII.B.31)

Les formules de r_p et r_s montrent une périodicité de la réflectance qui est fonction du nombre d'onde et des indices n_i des couches, si la variation de ces derniers est négligeable en fonction de la longueur d'onde. Les circuits intégrés sont formés d'empilements multidiélectriques, les résultats de l'optique des films minces sont applicables au contrôle par interférométrie réflectométrique.

II.B.3). *La simulation :*

II.B.3.1) Les lois de dispersion des indices de réfraction et d'absorption n et k :

L'indice de réfraction n est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur celle dans un milieu donné. k représente l'absorption de la lumière par le milieu, ce qui entraîne une diminution de la puissance du faisceau réfléchi. Ce coefficient d'extinction k est nul pour les milieux transparents. Les indices sont fonction de la longueur d'onde. Leur détermination est faite par des mesures ellipsométriques [12] ou à l'aide des formules de réciprocity de Kramer-Kroenig [14].

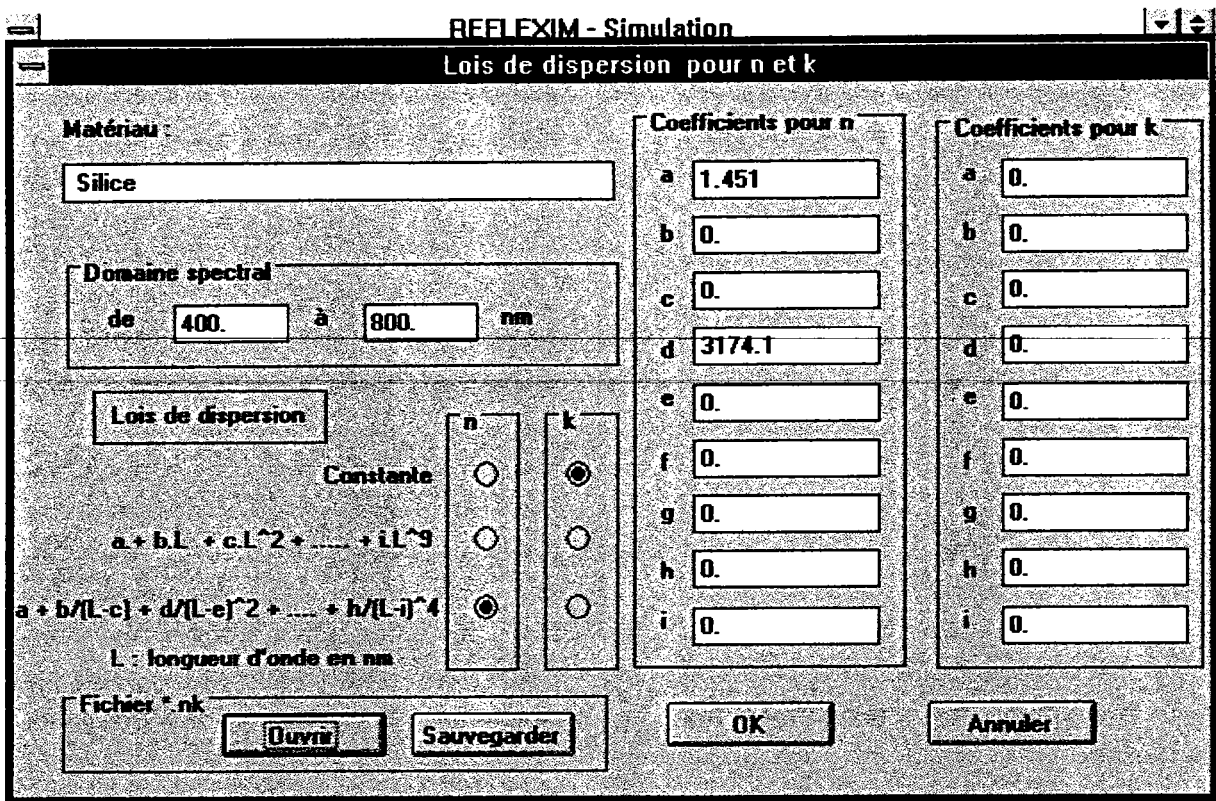


Fig.IIB.2 : Boite de dialogue pour les lois de dispersion.

L'analyse des différentes lois proposées dans la littérature [2], [15] montre une grande diversité : formule de Sellmeier, de Cauchy....

En majorité, la loi de dispersion d'un milieu peut être formulée sous une des formes suivantes :

$$n(\lambda) = A$$

$$n(\lambda) = A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3 + \dots$$

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda - C} + \frac{D}{\lambda^2 - E} + \dots$$

(EqIIB.32)

A, B, C, D, E, ... sont des constantes et λ la longueur d'onde.

Les lois sont différentes pour n et k. Cette liste non exhaustive englobe beaucoup de cas qui se présentent en micro-électronique. Naturellement, il faut aussi définir le domaine spectral pour lequel la loi est valide. n et k sont souvent donnés sous forme de tables dans la littérature. Nous modéliserons n et k à l'aide d'une de ces lois.

Un fichier contient le nom du matériau, la loi et les constantes associées pour n et k ainsi que le domaine spectral. Une boîte de dialogue permet de définir le milieu

incident, le milieu semi-infini, la succession des couches définies par leur épaisseur et le matériau pour le substrat. A la fermeture de la boîte de dialogue, un recouplement des domaines spectraux des différents constituants est effectué pour vérifier si une zone commune existe pour effectuer le calcul ultérieur. L'option "cinétique" permet de représenter les deux spectres correspondant aux épaisseurs initiales et finales de la première couche au cours d'un dépôt ou d'une gravure. De même, on précise l'angle d'incidence, un domaine spectral et le pas de progression pour la longueur d'onde. Pour la représentation, on choisit en abscisse : la longueur d'onde, le nombre d'onde ou le nombre d'onde multiplié par l'indice n de la première couche.

II.B.3.2). Les résultats :

Trois variables sont représentées à l'écran en fonction du type d'abscisse choisi. Les formules des coefficients de réflexion globaux permettent de calculer le flux réfléchi R , mais aussi les angles ellipsométriques ψ et Δ . Il nous a paru intéressant de les représenter pour élargir le champ d'application du logiciel de simulation.

$$R = \frac{1}{2} (|r_p| + |r_s|)$$

$$\psi = \arctan \left(\sqrt{\frac{|r_p|}{|r_s|}} \right) \quad (0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ)$$

$$\Delta = \arg \left(\frac{r_p}{r_s} \right) \quad (0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ)$$

(EqIIB.33)

Si le système ne comporte qu'un milieu incident et un substrat, le formalisme d'Abelès donne les formules de Fresnel pour le calcul des coefficients de réflexion.

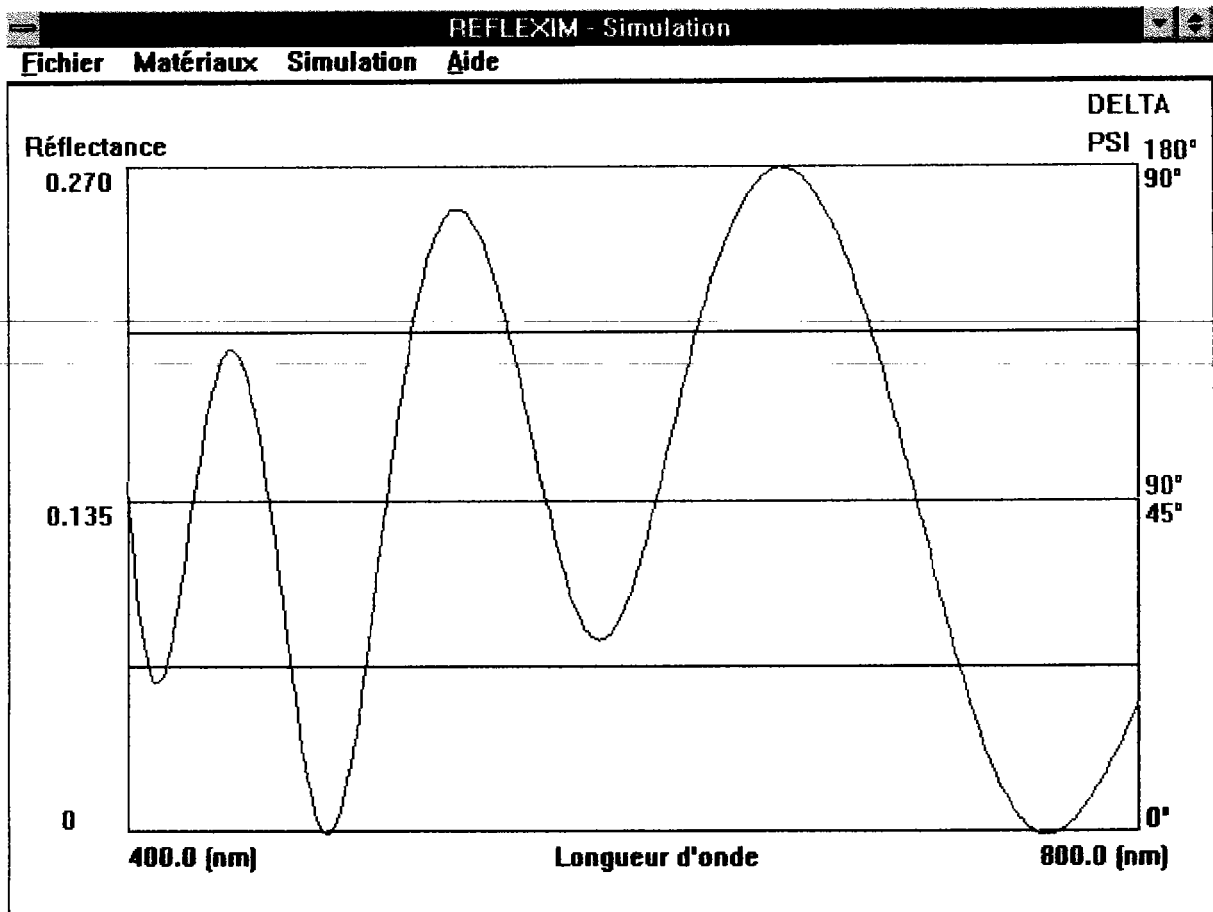


Fig.IIB.3 : Exemple de simulation.

Le tableau, ci-dessous, donne différents indices utilisés dans le programme :

Milieux	$n(\lambda)$ avec λ en nm	$k(\lambda)$ avec λ en nm
Vide	1	0
Silice	$1,451 + \frac{3174,1}{\lambda^2}$	0
Silicium	3,8	0,018 (à 633 nm.)
Nitride de Silicium	1,97	0

Fig.IIB.4 : Différents indices utilisés.

Dans l'exemple de simulation, donné en Fig.IIB.5, le milieu incident est le vide, le substrat du silicium et l'angle d'incidence est nul. On calcule le spectre pour une couche de silice pour trois épaisseurs différentes : 200nm, 500nm, 1000nm. On remarque une augmentation du nombre extrema avec l'épaisseur.

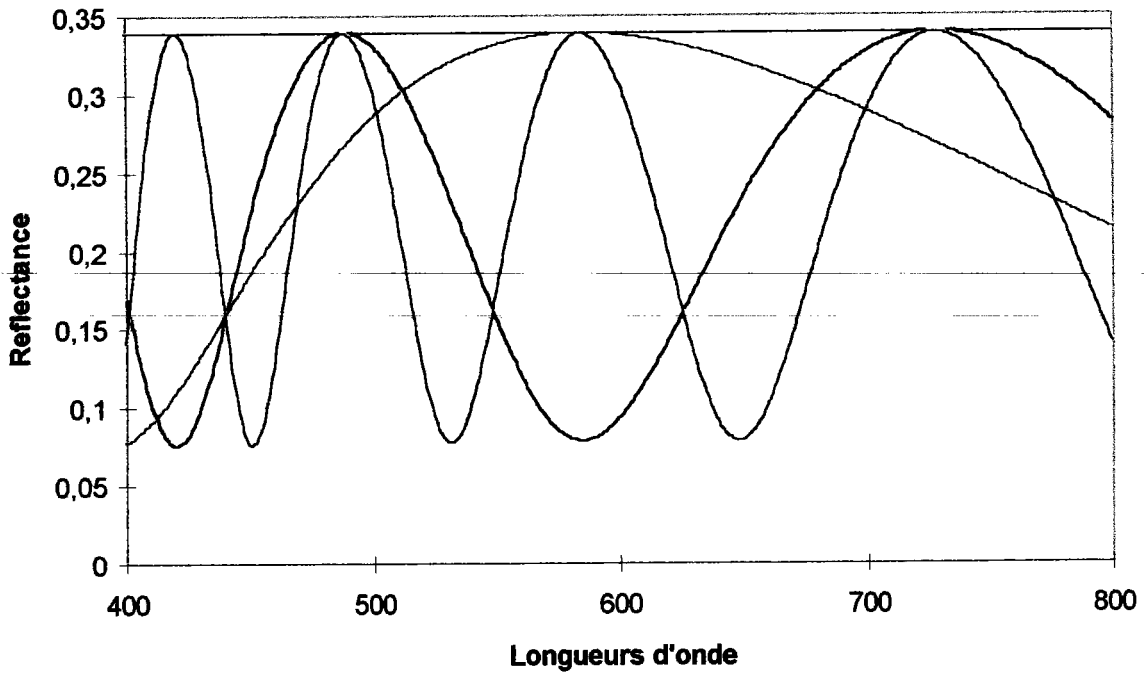


Fig.IIB.5 : Spectre de réflectance pour trois épaisseurs de silice différentes.

Lorsque le spectre est représenté en fonction du nombre d'onde, on remarque la quasi-périodicité du signal.

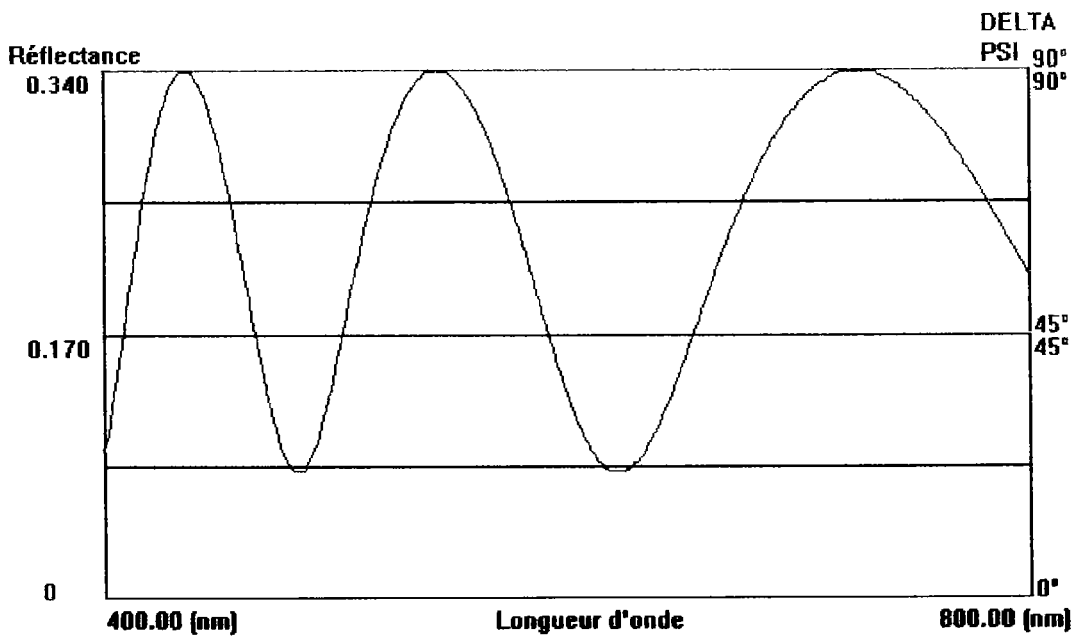


Fig.IIB.6.a : Représentation spectrale en longueur d'onde de la réflectance.

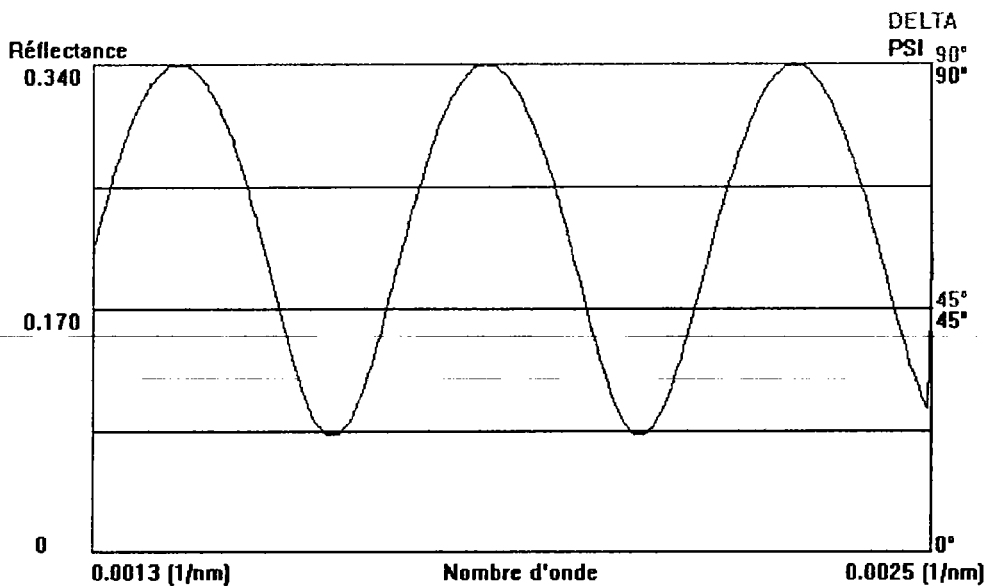


Fig.IIB.6.b : Représentation du spectre en nombre d'onde.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1(\lambda) d_1 = 2\pi d_1 (n_1(\lambda) \sigma)$$

(EqIIB.34)

δ_1 est le déphasage introduit lors de la traversée de la couche,
 λ la longueur d'onde dans le vide et σ son inverse : le nombre d'onde.

δ_1 varie avec le produit $n_1\sigma$, où n_1 est l'indice de réfraction de la couche qui dépend faiblement de la longueur d'onde.

On voit l'intérêt de faire une représentation en fonction de $n_1\sigma$ pour avoir un signal périodique. Pour les simulations de mesure interférométriques, seule la première couche est prise en considération. De ce fait, les coefficients de réflexion r possèdent la périodicité de $\cos \delta_1$. Par contre la réflectance R dépend de $\cos 2\delta_1$ à cause de l'élévation au carré.

Ce résultat est intéressant pour le calcul de l'épaisseur d'une couche sur un substrat à partir de l'interfrange, si l'indice de réfraction ne varie que faiblement avec la longueur d'onde. Cette méthode devient inexploitable si le nombre de couches devient supérieur à un. Le spectre de réflectance est alors la somme de plusieurs sinusoïdes de périodes différentes.

La simulation permet d'étudier l'influence des sous-couches sur la réflectance. On peut ainsi évaluer le nombre de sous-couches dont il faut tenir compte lors de l'inversion des équations dans le calcul de l'épaisseur de la première couche. Une étude de la contribution au spectre de la réflectance des couches situées sous une couche absorbante d'épaisseur non négligeable peut être aussi menée. Mais des réponses valables ne pourront être données qu'au cas par cas selon les empilements à étudier. Il

est certain qu'il faut connaître avec une bonne précision la nature des couches et leurs épaisseurs.

Sur le graphe, ci-dessous, on remarque l'influence de la sous-couche de silice et de son épaisseur. La périodicité du signal est moins évidente, car la matrice de transfert comporte des multiplications de sinus et de cosinus de période différente. Les conditions de simulation sont :

- domaine spectral : 400 - 800 nm,
- pas : 1 nm,
- milieu incident : l'air,
- angle d'incidence : nul,
- loi de dispersion de la silice : $n = 1,451$
 $k = 0$.

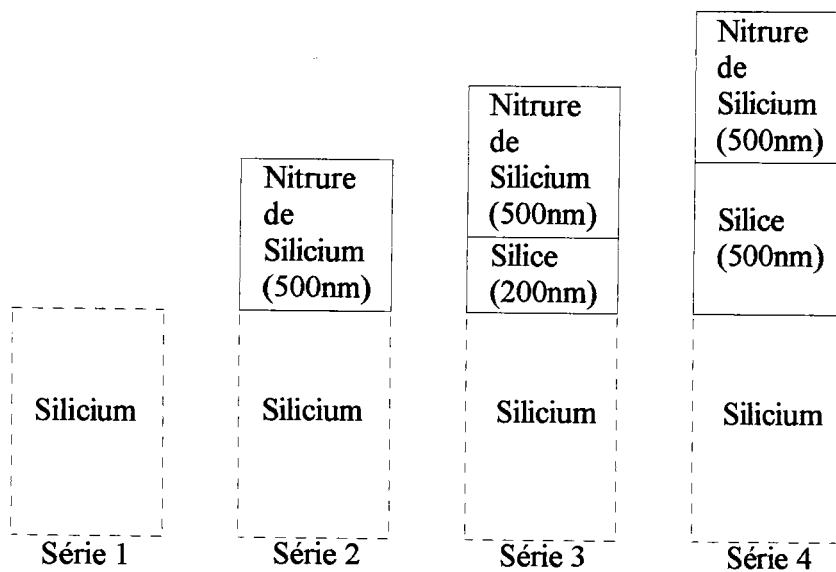


Fig.IIB.7 : Empilements utilisés pour la simulation.

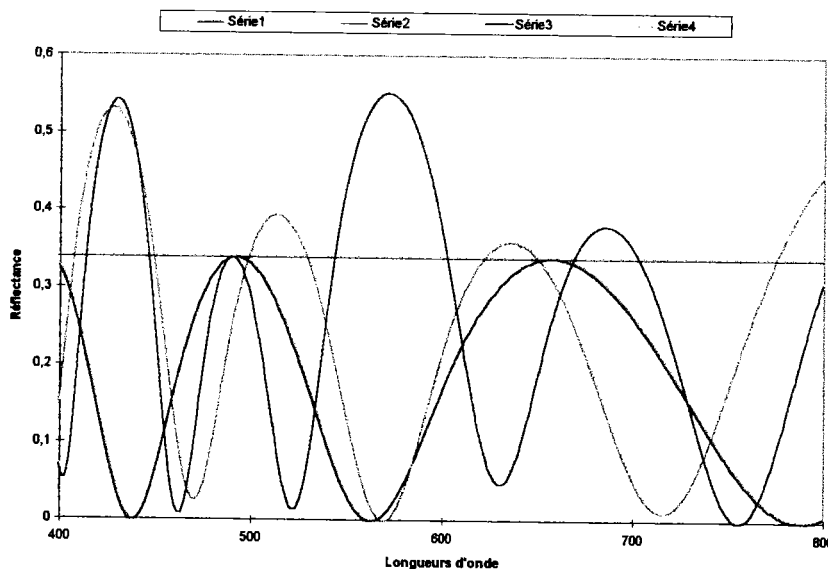


Fig.IIB.8 : Simulation multicouche.

II.C.a). *Imagerie - Positionnement :*

II.C.a.1). Avant-propos :

Avant de pouvoir procéder aux mesures interférométriques, il faut positionner le spot de mesure sur un site approprié. La matrice CCD de la caméra permet de faire des acquisitions d'images . On choisira un motif dans une image de référence de la première tranche d'un lot. On recherche ensuite la position du motif dans les images acquises sur les tranches présentées par la suite. Les écarts de position du motif entre l'image actuelle et la référence sont calculés et utilisés pour le pilotage de la table XY motorisée. Il faut donc adjoindre le module de positionnement à l'interféromètre. La conception du système doit fournir un positionnement rapide, précis et fiable.

Différents constructeurs ont été consultés et les critères de sélection retenus sont les performances de la carte d'acquisition, la richesse et l'accessibilité de la bibliothèque de traitement d'images proposée et le prix. Le choix final s'est porté sur la carte d'acquisition vidéo METEOR de la société MATROX associée à la bibliothèque de fonctions d'acquisition et de traitement d'images MIL écrite en langage C.

II.C.a.2). La recherche de motif :

Ce processus de recherche est décomposé en général en deux phases:

- L'appariement, qui est la recherche du motif dans l'image par une technique de corrélation . Il faudrait plutôt parler de régression, car une des variables perd son caractère aléatoire, puisqu'elle est fixée par l'expérimentateur au moment du choix du motif.

- La localisation, qui donne la position et l'orientation du motif dans l'image.

II.C.a.3). La corrélation discrète :

La corrélation discrète à deux dimensions est donnée par la formule suivante :

$$C_{i,j} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} I_{i+n,j+m} M_{n,m} \quad (\text{EqCa.1})$$

Avec $I_{i+n,j+m}$ les points de l'image et $M_{n,m}$ ceux d'un motif choisi. On peut faire dès maintenant les remarques suivantes :

- La corrélation discrète peut être considérée, dans son calcul, comme une convolution discrète dont le noyau est le modèle choisi,

- Le nombre des opérations est limité par le nombre de pixels constituant le motif. Pour chaque position de l'image, on superpose le modèle. Puis, on calcule la corrélation par la somme des produits de l'attribut de chaque pixel du motif par celui du pixel sous-jacent de l'image. Cette première formule est sensible aux variations de

l'éclairement de l'image, surtout si l'image est saturée. C'est pourquoi on lui préfère une formule normalisée :

$$CC_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I_{i+n,j+m} M_{n,m}}{\sqrt{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I_{i+n,j+m}^2}} \quad (\text{EqCa.2})$$

Le résultat passe par un maximum lorsqu'il y a accord entre le modèle et une partie de l'image, dont les coordonnées donnent la position dans l'image.

II.C.a.4). La fonction MATROX :

Un coefficient de corrélation empirique est calculé au point i, j de l'image I pour un motif carré M de côté N selon :

$$r = \frac{N^2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{i+n,j+m} M_{n,m} - \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{i+n,j+m} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} M_{n,m}}{\sqrt{\left[N^2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (I_{i+n,j+m})^2 - \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{i+n,j+m} \right)^2 \right] \left[N^2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (M_{n,m})^2 - \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} M_{n,m} \right)^2 \right]}} \quad (\text{EqCa.3})$$

Cette formule a l'avantage de ne pas être affectée par une variation linéaire des niveaux de gris de l'image ou du modèle, car on retranche le produit des moyennes de niveaux de gris de l'image et du motif au produit de corrélation (le numérateur de r possède la signification d'une covariance).

Dans le cas du traitement d'image, r est égal à un lorsqu'il y a corrélation parfaite entre une partie de l'image et le modèle, et voisin de zéro lorsque le motif est introuvable dans l'image. Des résultats négatifs ne reflètent que l'aspect aléatoire du système, notamment le bruit du signal enregistré, et ne présentent aucun intérêt dans notre cas.

En ce qui concerne le coefficient de corrélation en général, on peut faire qu'un test d'hypothèse sur la valeur nulle. Le seuil de signification du test permet de calculer l'intervalle de confiance. Si la valeur mesurée est en dehors du domaine de validité, on peut seulement rejeter l'hypothèse de l'absence d'une corrélation nulle, mais on ne peut pas en déduire une limite chiffrée, éventuellement affectée d'une probabilité, au-dessus

de laquelle il y a corrélation. Or c'est cette conclusion qui serait intéressante dans la recherche de l'image.

Dans l'état actuel de notre étude, nous pensons qu'il n'est pas possible de donner une signification statistique au coefficient de ressemblance que nous allons introduire. Il caractérise simplement le degré de similitude d'une partie de l'image par rapport à un motif qui a été choisi dans une autre image prise arbitrairement comme référence. On remarque de suite que le choix d'un motif est important : plus il comporte de singularité, plus on aura de chance d'avoir un résultat unique pour une zone de l'image.

II.C.a.4.1). Optimisation du calcul :

On calcule r^2 afin d'éliminer le temps du calcul de la racine carrée. Enfin nous introduisons un pourcentage de ressemblance Res , que nous nommons coefficient de ressemblance :

$$Res = [\max(r,0)]^2 \times 100 \quad (\text{EqCa.4})$$

Pour un motif donné et une zone de l'image, les termes $\sum \sum S.M$, $\sum \sum I^2$, $\sum \sum I$ sont à calculer pour chaque position. Le temps de calcul pour un processeur 486DX ayant une fréquence d'horloge de 66 MHz est plus de 30 mn pour rechercher un motif de 128x128 pixels dans de 512x512 pixels. Afin de diminuer le temps de calcul, on met en oeuvre 2 techniques pour réduire le nombre de positions à prendre en considération:

-La recherche hiérarchisée: le cheminement utilisé se résume à une observation éloignée de l'image et du motif pour une recherche grossière, puis on affine la position du motif en se rapprochant des zones où il a été observé. On réalise d'abord des suites d'images dont chaque élément représente un "niveau de résolution". Pour passer d'un niveau n à un niveau $n+1$ on divise l'image initiale en carrés de quatre pixels; la moyenne des niveaux de gris est calculée pour chaque carré; chaque moyenne est affectée dans l'ordre à un pixel de la nouvelle image dont les dimensions sont réduites de moitié (on perd en résolution). Les suites sont calculées pour l'image à analyser et pour le motif, en sachant que le niveau 0 de l'image correspond à la résolution maximale, celle de la caméra.

Le but est de commencer la recherche au niveau le plus haut pour l'image et pour le motif. tout en gardant à l'esprit qu'il ne faut pas perdre d'informations. On affine les recherches sur l'image de niveau inférieur que dans les zones qui présentent un maximum de corrélation. Cette technique est appelée communément "technique de recherche pyramidale". Chaque passage au niveau supérieur diminue d'un facteur 16 le nombre de sites à examiner et donc le nombre d'opérations. Un algorithme fixe le niveau en fonction des dimensions de l'image, celles du motif et de ses particularités, tout en limitant le risque d'échec de la recherche à cause de la diminution de la résolution.

- **La recherche heuristique** : en représentant le coefficient de corrélation en fonction de la position (i,j) du pixel de la zone de recherche, on remarque un pic plus ou moins large lorsqu'il y a concordance. Il n'est donc pas nécessaire d'examiner tous les pixels de la zone de recherche. Un calcul préliminaire, après avoir choisi le motif dans l'image de référence, détermine l'incrément à adopter en fonction de la largeur du pic.

La recherche utilise une combinaison de ces deux techniques par un calcul préliminaire, en fonction du motif choisi et des paramètres de recherche.

II.C.a.5). Intercorrélation - Autocorrélation :

Le positionnement utilise la fonction de recherche d'un motif choisi dans une image qui est prise comme référence. Cette fonction se base sur le calcul du coefficient de ressemblance entre le motif et une partie de l'image. Si ce coefficient est en dessous d'un seuil ressemblance fixé par l'utilisateur, on admet que la partie de l'image analysée n'est pas le motif recherché. Afin d'éviter toute ambiguïté dans le résultat de la position, il est nécessaire de choisir pour motif, des détails remarquables de l'image de référence. Ces détails doivent être, si possible, uniques dans l'image de référence.

La recherche du motif dans l'image de référence montre que le coefficient de ressemblance passe par un pic, dont la largeur est conditionnée par le motif lui-même. Une fraction de cette largeur définit le pas de progression des sites à analyser dans la recherche heuristique.

Le choix du motif par l'opérateur conditionne donc :

- La largeur du pic de ressemblance,
- La vitesse d'analyse,
- La position du motif dans l'image à analyser.

Il est intéressant d'étudier l'évolution du coefficient de ressemblance, si on modifie un détail du motif (dimensions ou niveau de gris). Une étude générale serait fastidieuse, aussi nous allons limiter l'étude à :

- une ligne de l'image,
- la variation des niveau de gris du motif représente une forme géométrique simple.

II.C.a.5.1). Le motif et l'image :

L'image et le motif sont représentés chacun par un tableau à une dimension. Chaque élément du tableau représente le niveau de gris d'un pixel (0 à 255 si le codage est sur 8 bits). Les modifications d'un détail du motif peuvent provenir soit :

- par ses dimensions,
- par la variations des niveaux de gris,

- par sa position dans le motif lui-même.

Pour étudier ces paramètres, nous utilisons le motif suivant :

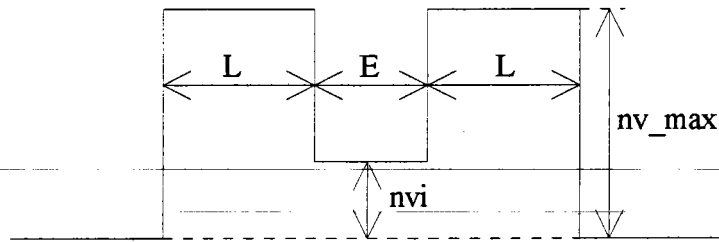


Fig.IIC.1 : Exemple de motif à rechercher..

Les paramètres d'études sont :

- L : la largeur d'un créneau,
- E : l'espacement des deux créneaux,
- nv_max : la hauteur d'un créneau en niveau de gris,
- nvi : le niveau de gris de l'espacement,
- la variation du nombre de créneaux.

Le calcul du coefficient de ressemblance étant commutatif, on fixe en général la forme du motif et on applique des variations à l'image.

II.C.a.5.2). L'autocorrélation :

Cette étude va nous renseigner sur la largeur du pic de corrélation, qu'utilise la recherche heuristique.

Le motif est créé avec les paramètres définis précédemment, puis il est recopié à une certaine position de l'image. Nous obtenons un coefficient de ressemblance pour chaque position de l'image et sa représentation va nous renseigner sur la variation de la largeur du pic en fonction des paramètres. On trouvera ci-après les courbes obtenues.

- Si L, E et nvi sont fixes, les courbes obtenues en fonction de nv_max sont toutes identiques.
- La Fig.IIC.2 donne les courbes obtenues en fonction de la variation de la largeur L.
- La Fig.IIC.3 donne les courbes obtenues en fonction de la variation de l'espacement E.
- La Fig.IIC.4 donne les courbes obtenues en fonction de la variation du niveau de gris de l'espacement.
- La Fig.IIC.5 donne les courbes obtenues en fonction de la variation du nombre de créneaux.

II.C.a.5.3). L'intercorrélation :

Pour un motif fixé, nous allons faire varier un paramètre des créneaux dans l'image.

Les paramètres du motif de l'étude sont : L = 30 pixels,

$$E = 30 \text{ pixels,}$$
$$nvi = 0,$$
$$nv_max = 255.$$

Les deux résultats qui nous intéressent sont :

- la valeur maximum du pic du coefficient de ressemblance, qui sert de discriminant pour la recherche,
 - La position de ce maximum qui donne la position du motif dans l'image.
- La Fig.IIC.6 donne les courbes obtenues en fonction de la variation de la largeur L ; On simule ainsi une variation de la distance objet caméra.
- La Fig.IIC.7 donne les courbes obtenues en fonction de la variation de l'espacement E; On simule une variation de la position d'un détail du motif par rapport à son environnement.
- La Fig.IIC.8 donne les courbes obtenues en fonction de la variation du niveau de gris de l'espacement.
- La Fig.IIC.9 donne les courbes obtenues en fonction de la variation du niveau de la pente des créneaux; Par cette variation, on introduit la notion de flou.

Ainsi, par ces simulations, nous pouvons définir ce qu'est un "bon choix de motif". La figure IIC.10 résume les divers cas.

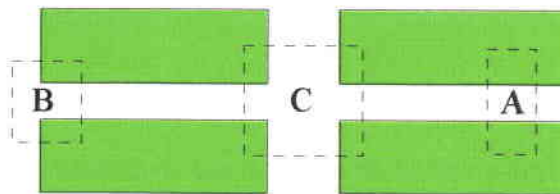


Fig.IIC.10 : Choix d'un bon motif.

Cas A : Le motif ne doit pas être de trop petite taille, car on obtient une suite de maximum de ressemblance.

Cas B : Il ne doit pas introduire une incertitude sur la position trouvée. Les détails choisis pour former l'ensemble du motif ne doivent pas être présents plusieurs fois dans l'image.

Cas C : La surface du motif doit être suffisamment grande afin d'englober le plus de détail possible.

II.C.b). *Imagerie - Mesures dimensionnelles*

II.C.b.1). Mesures de surfaces.

Pour cette analyse dimensionnelle, nous utiliserons la bibliothèque MIL de notre carte d'acquisition.

Les principales étapes pour cette mesure sont :

- définir des marqueurs délimitant la zone à mesurer,
- acquérir l'image,
- retrouver le motif dans l'image ainsi que les marqueurs associés,
- calculer la surface.

II.C.b.2). Autofocus de la caméra.

La méthode d'autofocus que nous avons étudiée est basée sur la Transformée Discrète du Cosinus (TDC). Il a été démontré que cette méthode est efficace, robuste dans la mise au point d'une image.

La Transformée Discrète du Cosinus a été définie par Ahmed Natarajan et Rao en 1974 [22]. Dans sa version normalisée elle devient :

$$\begin{aligned}C(0) &= \frac{1}{\sqrt{(N)}} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \\C(u) &= \sqrt{\left(\frac{2}{N}\right)} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cos[\pi u(2m+1) / 2N] \\u &= 1,2,\dots, N-1\end{aligned}\tag{EqCb.1}$$

La transformée inverse donne :

$$X(m) = \frac{1}{\sqrt{(N)}} C(0) + \sqrt{\left(\frac{2}{N}\right)} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cos[\pi u(2m+1) / 2N]\tag{EqCb.2}$$

Relation entre une image et la TDC:

D'une façon générale, une image possède une partie "basse fréquence": représentant la luminance de l'image, et une partie "haute fréquence" donnant les contours et les changements de luminance. D'un point de vue mathématique, la TDC est directement reliée à la morphologie de l'image. Aussi, pour

une mise au point automatique (autofocus), il suffit de trouver la position qui correspond au maximum d'intensité de la fonction poids de l'image.

$$I(z) = \sum_{u=u_1}^{u_2} |C(u, z)| \quad 0 < u_1 < u_2 < N - 1$$

(EqCb.3)

Fig.IIC.2 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la largeur L.

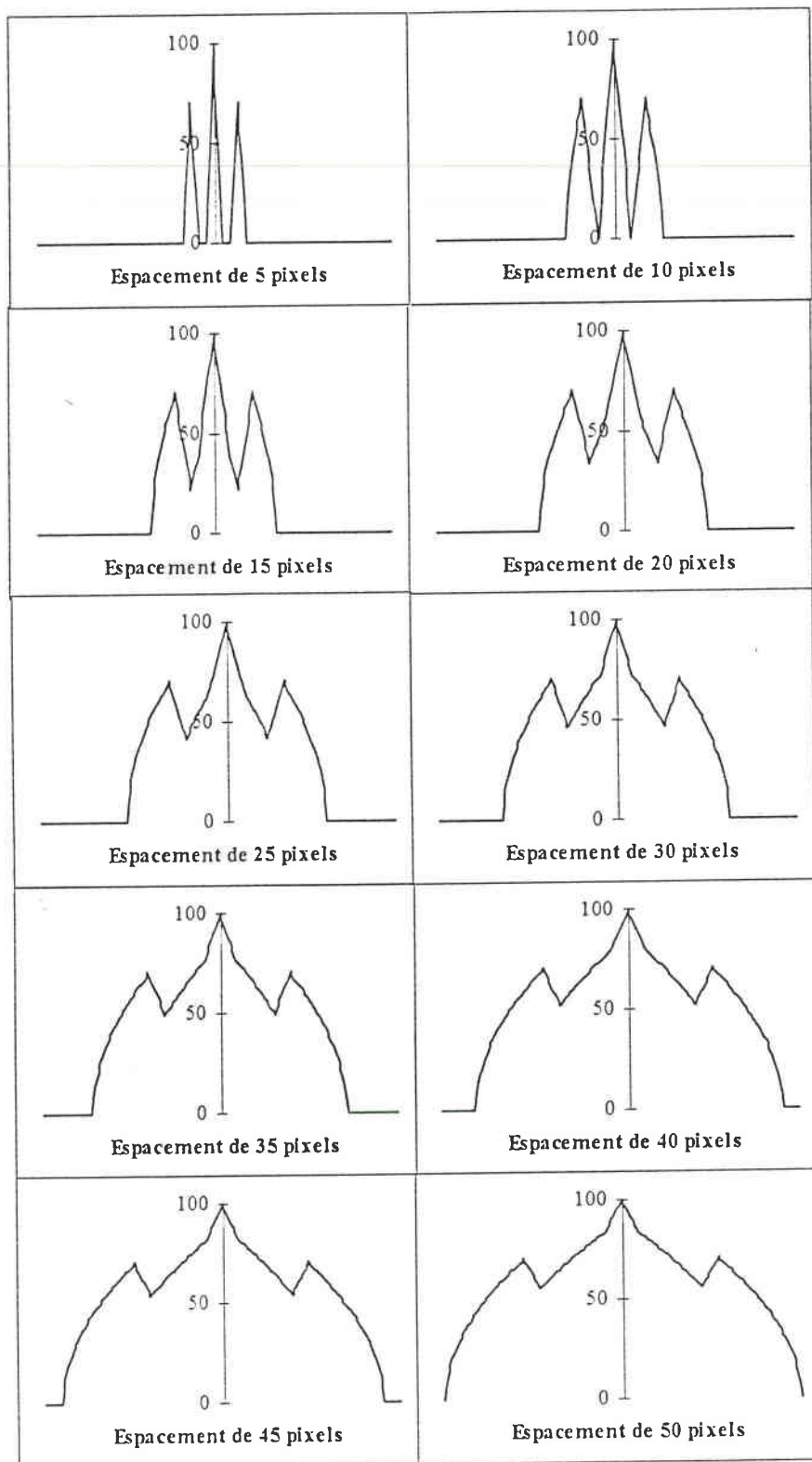


Fig.IIC.3 : Variation du coef. de ressemblance en fct de l'espacement E.

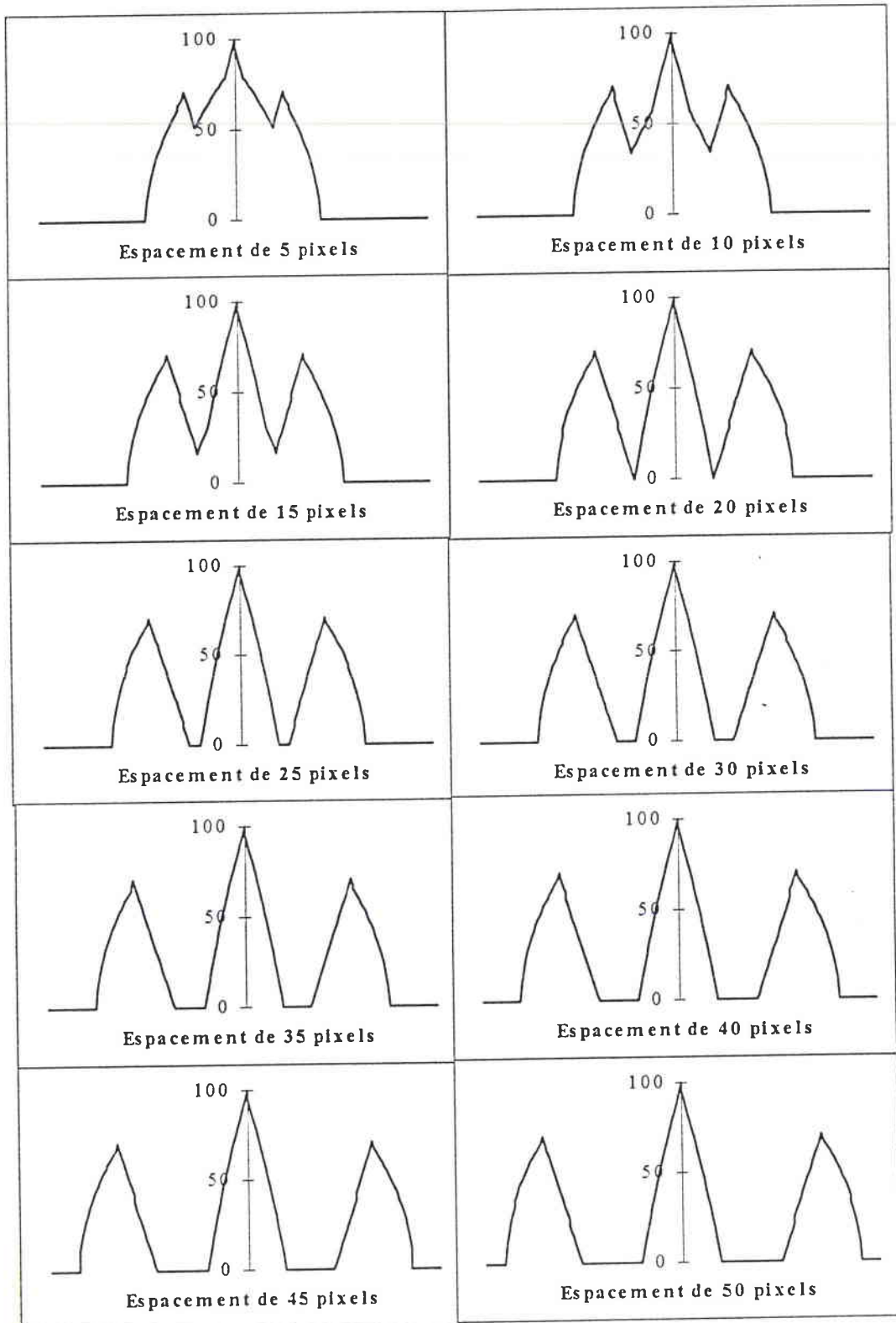


Fig.IIC.4 : Variation du coef. de ressemblance en fct du niveau de gris de E.

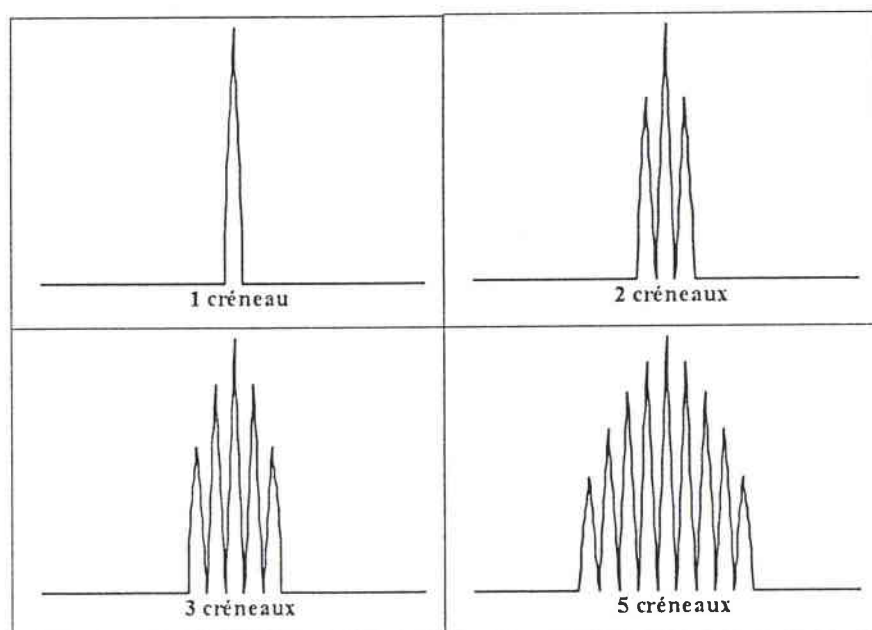
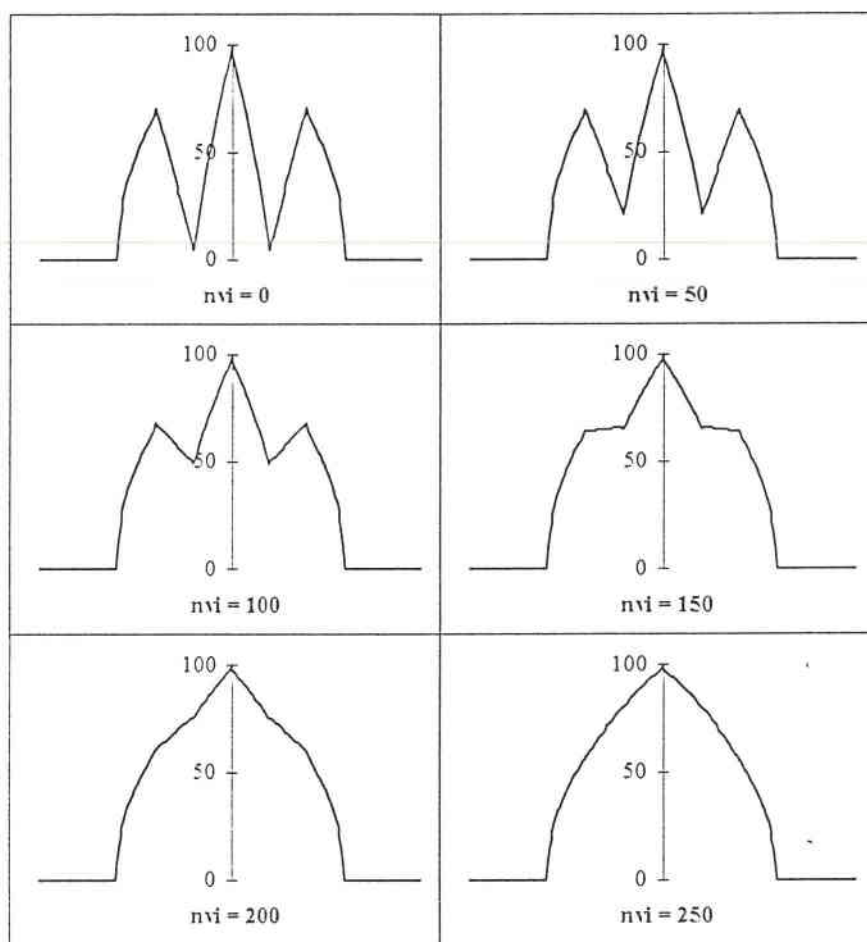


Fig.IIC.5 : Variation du coef. de ressemblance en fct du nombre de créneaux.

Fig.II.C.6 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la largeur L.

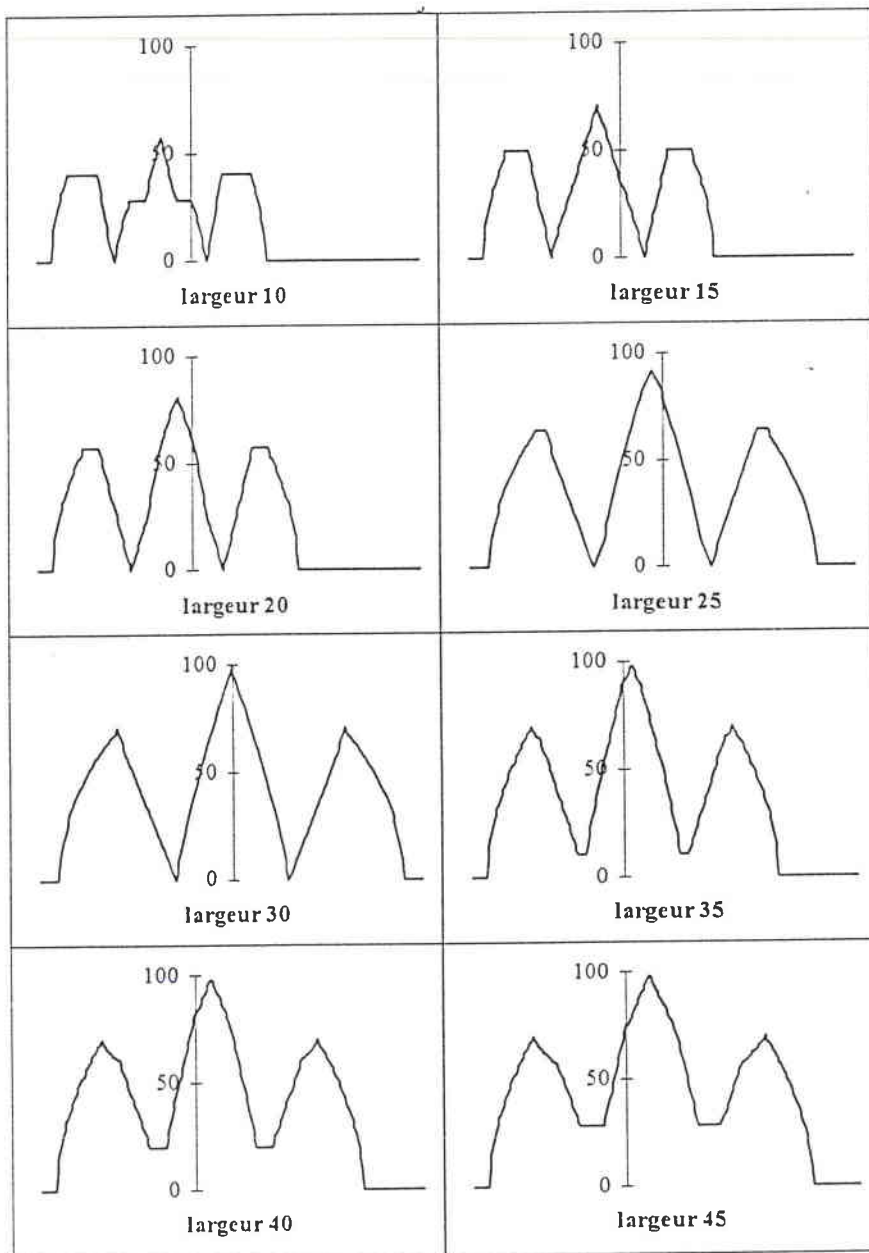


Fig.IIC.7 : Variation du coef. de ressemblance en fct de l'espacement E.

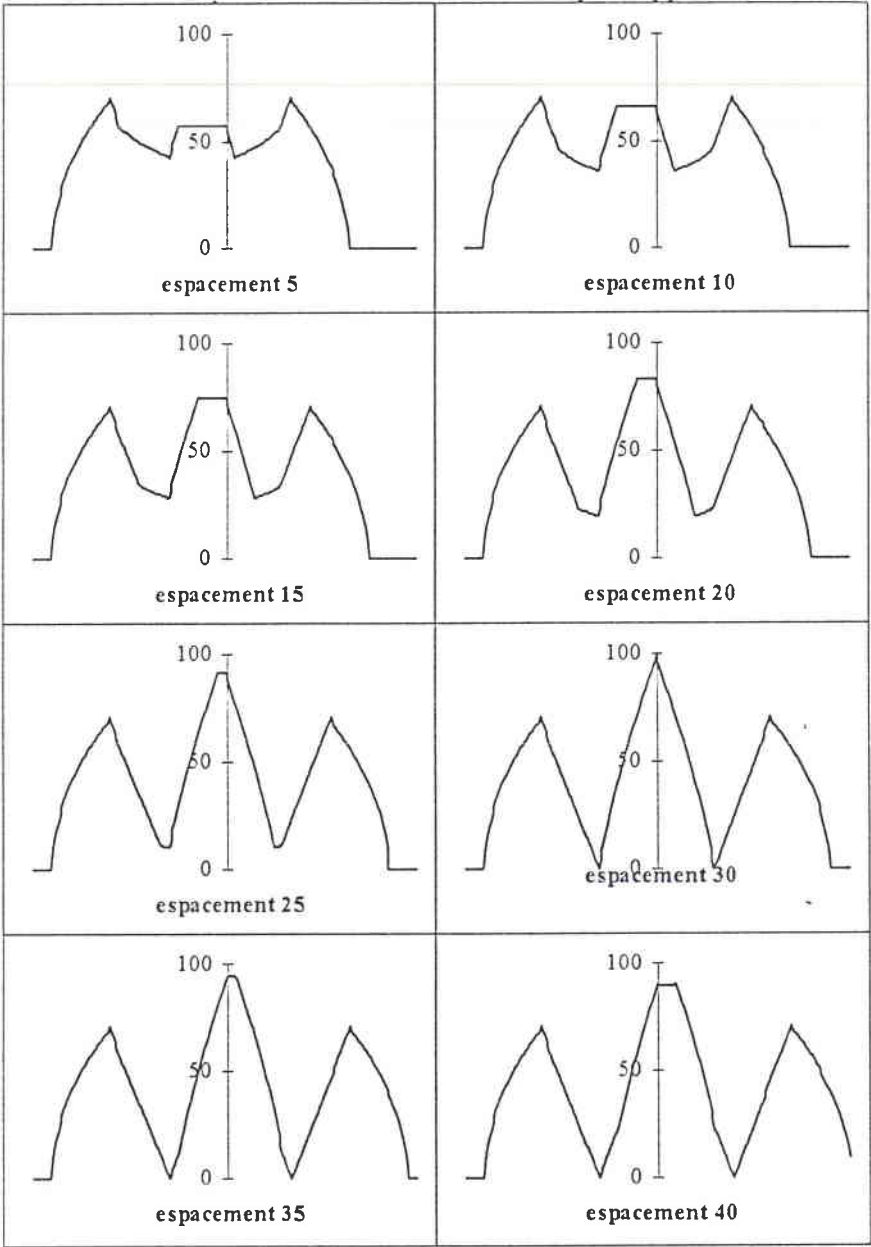


Fig.II.C.8 : Variation du coef. de ressemblance en fct du niveau de gris de E.

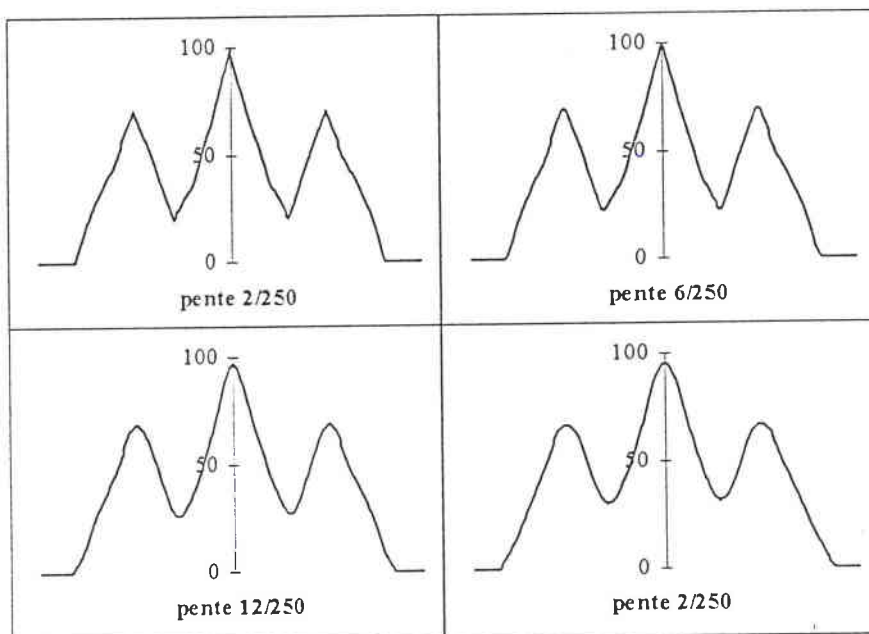
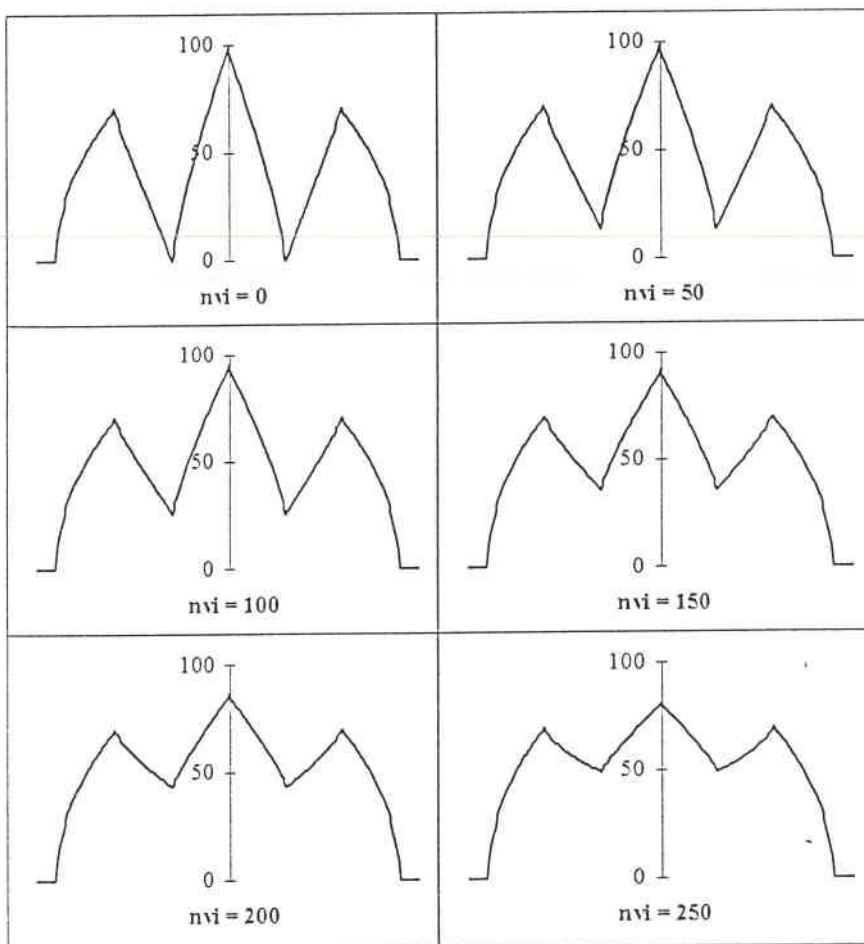


Fig.II.C.9 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la pente du créneau.

Chapitre III

DÉVELOPPEMENT EXPÉRIMENTAL

Les pages suivantes décrivent la partie expérimentale de cette étude. Dans la première partie de ce chapitre, le choix et la description du système utilisé pour la mesure d'épaisseur sont détaillés. Après l'étude la description du montage, une présentation succincte du logiciel est faite et les premiers résultats tant de simulations que de manipulations sur des échantillons monocouches, puis multicouches, sont donnés. Ces résultats seront comparés aux mesures obtenues sur un Nanospectromètre (système de mesure d'épaisseur industriel commercialisé par la société Nanométrics).

La seconde partie de ce chapitre traite du choix et de la description du matériel utilisé pour l'imagerie et le positionnement du spot d'analyse sur le site particulier de mesure. Cette présentation est suivie par la description du logiciel associé. L'analyse des résultats est concentrée autour de la précision, de la reproductibilité de la recherche du motif et du positionnement. Enfin, on trouvera une analyse des causes d'échec possibles à la reconnaissance d'image observées au cours de ce développement expérimental préliminaire.

III.A). Expérimentation préliminaire sur la mesure d'épaisseur:

III.A.1). Choix et description du système :

III.A.1.1). Synoptique de la mesure dimensionnelle :

Le montage expérimental utilisé est décrit à l'aide du synoptique de mesure, donné ci-dessous. Ce dernier se compose :

1. d'une source lumineuse,
2. d'une caméra CCD, utilisée pour la visualisation des structures du wafer et pour la détection,
3. d'un ensemble spectrographe et détecteur à photodiodes,
4. d'un ordinateur analysant les informations issues de la barrette de photodiode et calculant l'épaisseur de la couche mince.

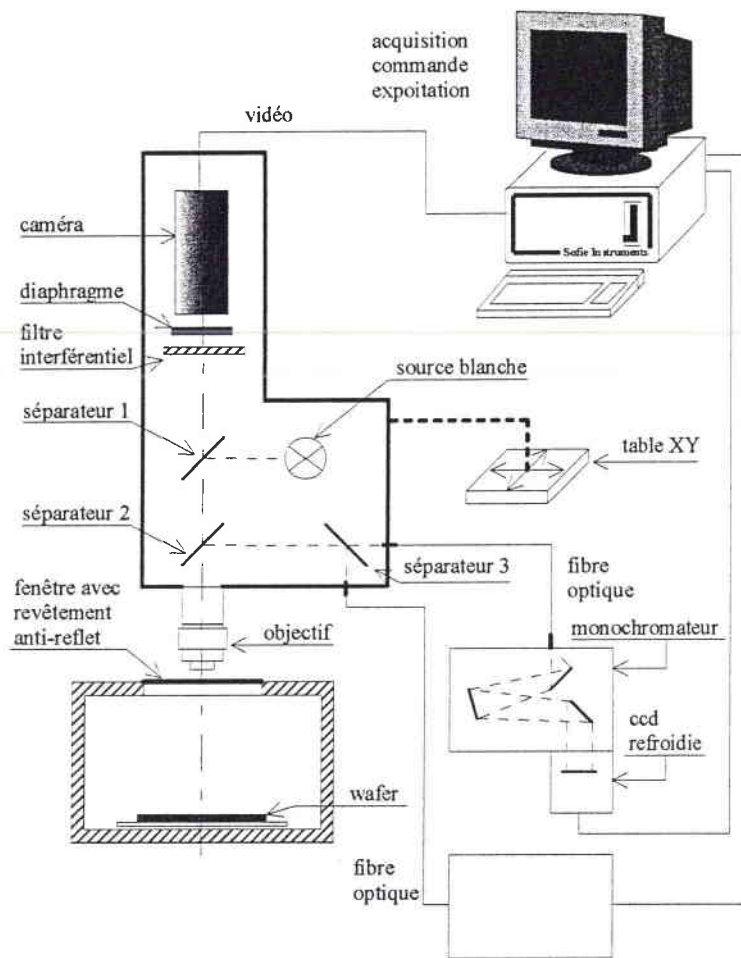


Fig.IIIA.1 : Synoptique de la mesure dimensionnelle et du positionnement

III.A.1.2). La source lumineuse :

Pour produire un spectre cannelé, la source utilisée doit avoir un domaine spectral le plus large possible et le plus uniforme dans ce domaine. Les sources Xénon (75 Watts) d'Hamamatsu sont utilisées. Le tableau, ci-dessous, rassemble les principales caractéristiques de ces lampes :

Puissance	75 Watts
Taille de l'arc	1,3 mm
Matériau du bulbe	Silice
Gamme spectrale	185-2000 nm.
Courant d'alimentation	5,4 Adc
Tension d'alimentation	15 Vdc
Tension d'allumage	15 kV
Stabilité	0,2 - 0,3% p-p
Durée de vie	2000 heures

Fig.IIIA.2 : Principales caractéristiques de la lampe Xénon.

On trouvera dans l'annexe 2. de plus amples détails sur ce type de lampe, son alimentation et son intégration dans le rack source que nous avons réalisé.

Cette intégration permet, outre le maintien de la lampe et son refroidissement, la mise en position de la fibre optique de façon à ce que l'énergie de l'arc Xénon (1,3 mm) pénètre dans la fibre optique.

La figure, ci-dessous, donne la réponse spectrale de la lampe xénon dans les conditions expérimentales où le faisceau incident se réfléchit sur une plaque de chrome. Ce dernier est analysé par le monochromateur et le détecteur à photodiodes dont la description est donnée plus loin :

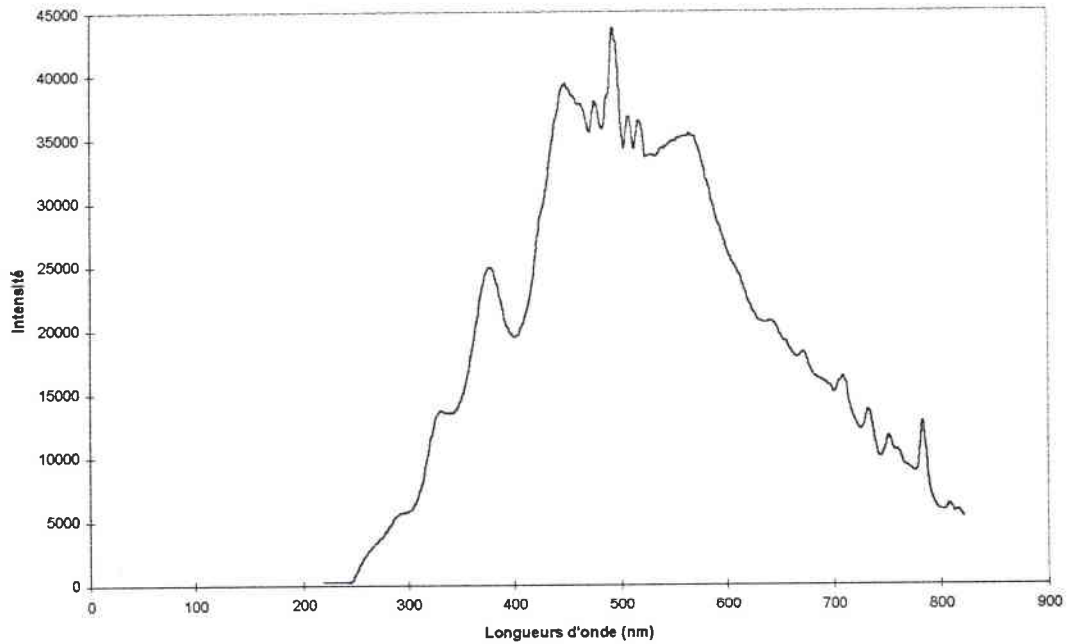


Fig.IIIA.3 : Spectre de la lampe Xénon.

III.A.1.3). La caméra CCD :

La figure IIIA.5 présente le synoptique de la caméra utilisée.

On trouvera, ci-dessous, les principales caractéristiques du module CCD VCM3250 (Philips) utilisé dans la caméra pour la visualisation de l'image :

Nombre de Pixel (version CCIR)	512 (H) x 582 (V)
Dimension du capteur CCD	1/2 inch
Système de balayage	CCIR : 625 lignes, entrelacées / 50 Hz
Illumination minimale (objectif F 1,4)	0,5 Lux
Gamme spectrale	400nm - 1000nm
Rapport signal sur bruit	> 50 dB
Consommation	< 2W
Sortie Vidéo	1 Vpp, vidéo composite sous 75 Ω

Fig.IIIA.4 : Principales caractéristiques du module CCD VCM3250.

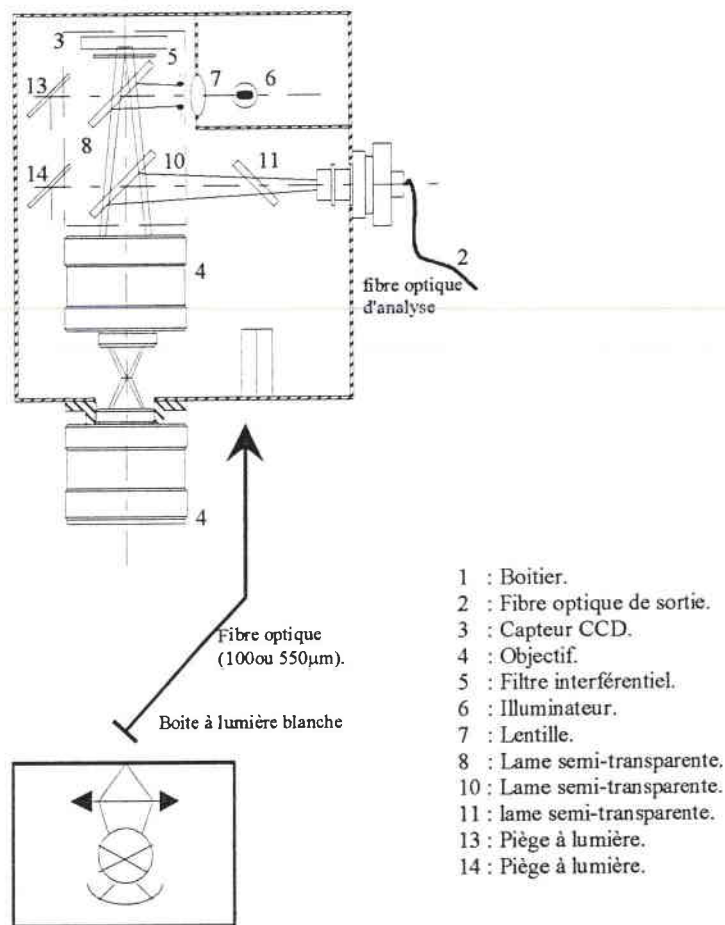


Fig.IIIA.5 : Synoptique de la caméra.

Le faisceau lumineux issu de la lampe Xénon est transporté par fibre optique au niveau inférieur de la caméra. Les séparateurs 10 et 11 sont utilisés pour diriger ce faisceau sur le wafer à travers l'objectif de la caméra. Après réflexion sur l'échantillon, le faisceau suit, en sens inverse, le même chemin optique, pour être recueilli par la fibre optique de réception et transporté à l'entrée du monochromateur SDA 200.

Une lampe à filament de 20 W intégrée à la caméra est utilisée pour former l'image de l'échantillon sur la matrice CCD permettant ainsi l'alignement du spot de la lampe Xénon sur la zone de test du wafer.

La caméra est montée sur une table XY manuelle et équipée de vis micrométriques permettant le déplacement et le positionnement du spot d'analyse sur le site de mesure avec une très grande précision.

III.A.1.4). Le capteur :

Le capteur est constitué de deux éléments:

1. un monochromateur SDA 200 de conception Sofie Instruments.
2. une barrette de photodiodes HAMAMATSU refroidie C5964.

L'annexe 5 donne les principales caractéristiques de cet ensemble.

Description:

1. Le monochromateur :

Le SDA 200 est constitué d'un réseau à champ plan dispersant le faisceau lumineux recueilli par la fibre optique de réception correspondant à une étendue spectrale comprise entre 190-820 nm sur une longueur de 25,6 mm. On trouvera en annexe 5, les caractéristiques des réseaux utilisables avec notre système. Au plan focal de ce spectrographe est montée une barrette de 1024 photodiodes refroidies ou intensifiées.

Les lentilles de l'objectif de la caméra étant en verre, le spectre cannelé recueilli par le détecteur est limité au domaine spectral 425-850 nm.

Ce spectre est alors analysé par l'unité centrale de contrôle et de calcul d'épaisseur.

2. Le détecteur :

L'annexe 5 rappelle quelques notions importantes sur ce type de capteur.

Le détecteur utilisé :

La barrette de photodiodes est du type N-MOS, constituée de 1024 pixels, de chez HAMAMATSU. Associée à son électronique de commande et de contrôle, ce détecteur porte la référence C5964-1010. Ce détecteur comporte un élément Peltier refroidissant la partie active à 0 °C (dans notre configuration). On trouvera, ci-dessous, les principales caractéristiques de cet ensemble.

Nombre de pixel	1024
Taille du pixel	25µm x 2500µm
Zone active	25,6mm x 2,5mm
Réponse spectrale	200nm. à 1000 nm.
Maximum de sensibilité	600 nm.
Charge à saturation	25 pC
Courant d'obscurité	0,004 pA/pixel

Fig.IIIA.6 : Principales caractéristiques du détecteur C5964.

Afin de réduire le temps d'intégration et permettre d'observer de très faibles flux lumineux, nous avons aussi utilisé un intensificateur d'image. L'annexe 5-B donne un rappel sur le fonctionnement de l'intensificateur d'image.

L'intensificateur d'images :

Dans cette étude, nous avons utilisé l'intensificateur d'image V3366U d'HAMAMATSU dont les principales caractéristiques sont rassemblées ci-dessous :

Réponse spectrale	160 à 850 nm.
Matériaux de la photocathode	Multialcaline
Diamètre de la photocathode	25 mm (ou 18mm)
Matériaux de la fenêtre d'entrée	Silice synthétique
Epaisseur de la fenêtre	5,9 mm
Matériaux de l'écran phosphore	P-20
Sensibilité de la photocathode	170 $\mu\text{A} / \text{lm}$
Résolution	30 ligne / mm.
Gain typique	$1,2 \times 10^4$

Fig.IIIA.7 : Principales caractéristiques de l'intensificateur.

Montage d'utilisation générale :

Pour utiliser un système construit autour d'un capteur à photodiodes, on représente le schéma suivant. La mise en forme des horloges, l'amplification sont intégrées sur le circuit de contrôle de la barrette. Cette carte est un produit Hamamatsu.

L'ensemble interface - CAN de ce schéma est intégré sur la carte d'acquisition Sofie dont la description est donnée dans le paragraphe qui suit.

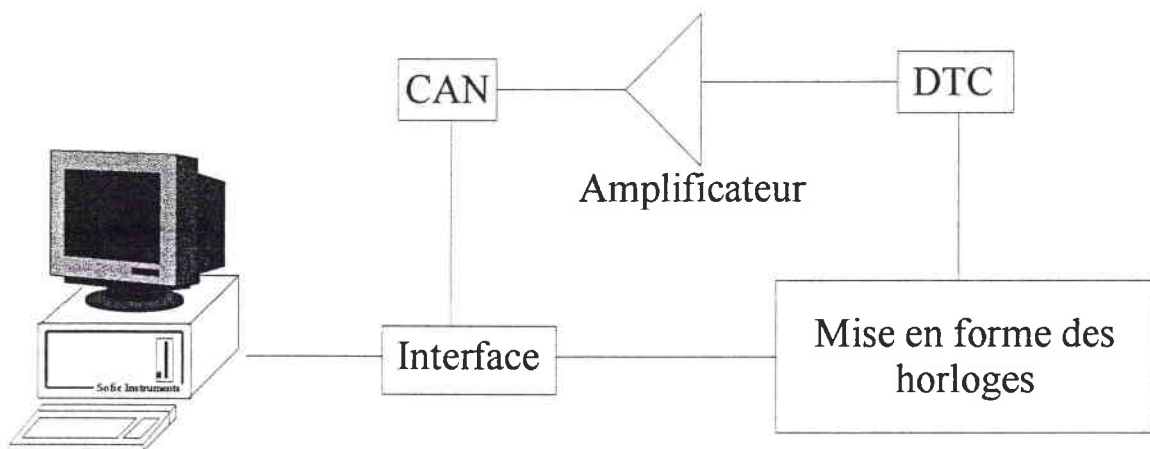


Fig.IIIA.8 : schéma général d'un système DTC.

III.A.1.5). La carte d'acquisition SOF 30721.

L'annexe 6 décrit plus en détails cette carte d'acquisition.

Elle effectue les fonctions principales suivantes :

- Filtrage des signaux analogiques.

- Conversion Analogique / Numérique après traitement du signal.
- Stockage dans la RAM
- Transfert vers le PC via les FIFOs
- Conversion Numérique / Analogique : Signaux de commandes.

Cette carte est dotée de son propre processeur le 80C31, qui décharge le microprocesseur 486 DX de la carte mère du PC, des tâches simples, gérant l'acquisition. L'ordinateur peut ainsi traiter d'anciennes données pendant que la carte SOF30721 en acquiert de nouvelles. C'est la solution la plus efficace qui est actuellement utilisée dans tout système Sofie et qui permet le fonctionnement en temps réel.

Le tableau, ci-dessous, rassemble les principales caractéristiques de cette carte d'acquisition :

Fonctions	I/O TTL, conversion A/N, N/A trigger interne ou externe
Microcontrôleur	80 C 31
Adresse de base conseillée	1500 h, 15C0 h, 1300 h
Nombre d'adresse mémoire occupée	4 à partir de l'adresse de base
Echange d'information	FIFO (4kocets)
Fréquence d'horloge	16 Mhz
Capacité de stockage de donnée	61199 octets
Capacité de stockage de programme	64 kocets
Nombre de voies en entrée	4 unipolaires sur sub D9 points
Réglage d'offset et de gain	indépendant sur chaque voie
Filtrage	Sallen-Key d'ordre 4, un par voie
Gain programmable	1, 2, 4, 8
Conversion analogique	16 bits
Fréquence maximale d'acquisition	20 kHz
Conversion Numérique-Analogique	un double DAC 16bits et un double DAC 12 bits
Horloge et synchro externe	opto isolées
Entrées-sorties logiques	disponible sur sub-d 25 points : 1 port de 8 bits en entrée ou en sortie 1 port de 4 bits en entrée ou en sortie 6 bits en entrée ou en sortie

Fig.IIIA.9 : Principales caractéristiques de la carte d'acquisition.

III.A.1.6). L'unité centrale :

Construit autour d'un PC Pentium 90 MHz, l'unité centrale comporte la carte d'acquisition assurant la gestion du détecteur de photodiodes et la digitalisation du signal vidéo issu de ce capteur.

Les spectres cannelés ainsi numérisés sont alors analysés par le logiciel qui extrait de ces données l'épaisseur de la couche superficielle de l'empilement.

III.A.2). Organigramme du logiciel

L'annexe 7 donne l'ensemble des procédures informatiques utilisées lors des premières déterminations d'épaisseurs de couches.

La méthodologie est résumée ci après :

- Acquisition d'un spectre de référence :
contrôle de l'amplitude moyenne :

$$\overline{y}_{réf} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} y_{réf,i} > \text{seuil amplitude} \quad (\text{EqIII.7})$$

- Acquisition d'un spectre :
contrôle de l'amplitude moyenne :

$$\overline{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} y_i > \text{seuil amplitude} \quad (\text{EqIII.8})$$

- Calcul du spectre relatif :

$$y_{div,i} = y_i / y_{réf,i} \quad (\text{EqIII.9})$$

- Contrôle du contraste par le calcul de l'écart type normalisé par rapport à une régression linéaire de pente a et d'ordonnée à l'origine b :

$$\langle \sigma \rangle = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N-1} \left(\frac{y_{div,i}}{a\lambda_i + b} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} < \text{seuil contraste} \quad (\text{EqIII.10})$$

- Choix de la technique de calcul :

1. méthode des minima et maxima (si nombre d'extrema > 2)
2. méthode des extrema (si < 2)
3. mise en cascade des méthodes 1 et 2.

III.A.3). Les résultats :

III.A.3.1). Validation préliminaire de la détermination d'épaisseur.

Pour cette étude nous avons procédé par étapes successives:

- 1. analyse des spectres cannelés sur échantillon monocouche. L'annexe 7 présente les premiers résultats sur les spectres cannelés sur des échantillons composés d'une seule couche de nitrure, polysilicium sur nitrure, oxyde, silicium amorphe, résine

-2. développement du logiciel de calcul. Simulation - Validation des différentes méthodes. L'annexe 7 présente quelques résultats de simulation. Dans cette phase, il s'agit de créer une courbe théorique, d'ajouter un bruit aléatoire puis à partir de ces données, de retrouver la courbe, donc l'épaisseur originale.

-3. Validation de la détermination d'épaisseur sur un produit réel. L'annexe 7 présente des exemples de résultats de calculs d'épaisseur réalisés par le logiciel développé sur environnement Windows, sur un échantillon constitué d'une couche de TEOS.

III.A.3.2). Mesures d'épaisseurs sur site :

Une première campagne de mesures d'épaisseurs sur site (IBM) a été effectuée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux fournis par l'appareil utilisé actuellement en ligne : le Nanospec / AFT de la société Nanometrics.

III.A.3.2.1). Le Nanospectromètre :

L'opérateur place une tranche à mesurer sur la platine et localise à l'aide d'un binoculaire la zone pour effectuer la mesure. Un type d'empilement est choisi parmi ceux définis, ainsi que le grandissement de l'objectif du microscope (x10, x40, x100). Une source lumineuse blanche éclaire l'empilement. Le rayon réfléchi traverse l'objectif, puis il est dispersé par un monochromateur. Le spectre est enregistré entre 480 et 790 nm. L'épaisseur est calculée à partir des interférences mesurées. Si l'interfrange est faible, un grossissement plus important est choisi pour augmenter la précision. L'incertitude du résultat dépend de l'appareil et du modèle physique utilisé pour les calculs de l'épaisseur [17], [18].

III.A.3.2.2). Les résultats :

III.A.3.2.2.a). Résultats statiques.

Au cours de ces expériences, l'arc Xénon fournit un spectre d'émission continu entre 450 et 750nm. L'objectif de la caméra focalise le faisceau sur le site de mesure choisi et récupère le faisceau réfléchi.

Chaque longueur d'onde interfère différemment dans la structure à mesurer, ce qui produit une modulation du spectre réfléchi. La barrette de photodiodes enregistre celui-ci puis le signal est numérisé et traité par l'algorithme de calcul.

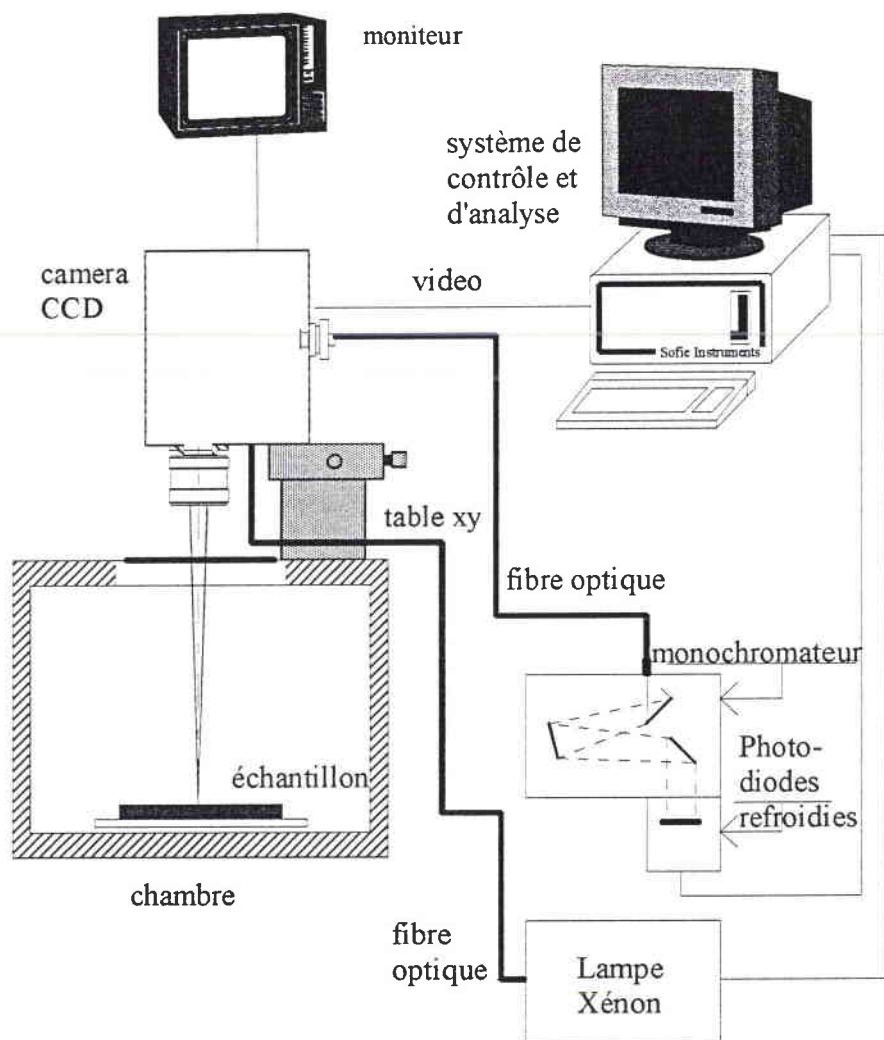


Fig.IIIA.10 : Synoptique du prototype.

Nos premières mesures sur site sont effectuées sur des tranches monocouches dont le substrat est du silicium.

Matériaux	Epaisseur en nm Système Sofie	Epaisseur en nm Nanospectre	Ecart en nm
Résine	1564,5	1568,5	-4,0
	1567,1	1564,8	2,3
	1566,7	1565,9	0,8
Silice	512,5	522,0	-9,5
	540,0	530,0	10
	512,5	522,0	-9,5
	88,0	88,0	0,0
	530,6	530,0	0,6
	87,6	83,7	3,9
Nitrure de Si	187,4	185,7	1,7
	187,0	185,7	1,3
	96,8	99,6	-2,8

Fig.IIIA.11 : Résultats pour les systèmes monocouches.

Le coefficient de corrélation entre les deux méthodes est de 0,999958 et l'équation de régression est :

$$\text{Epaisseur_Sofie} = -0,13560 + 0,99952 \text{ Epaisseur_Nanospectre}$$

Les deux méthodes donnent des résultats similaires et les écarts s'expliquent par :

- ⇒ les mesures qui ne sont pas effectuées sur la même zone.
- ⇒ les calculs qui sont effectués avec des indices de réfraction propres à chaque appareil.

Systeme multi-couches :

Pour les systèmes multicouches, les mesures donnent un coefficient de corrélation plus faible 0,99778. Cette baisse provient des incertitudes sur les épaisseurs des sous-couches.

Le calcul des épaisseurs des deux couches supérieures, à l'aide du logiciel, donne une valeur pour le χ^2 inférieure d'un facteur 2 à 3 par rapport au calcul sur une seule couche.

Matériaux	Epaisseur en nm Système Sofie	Epaisseur en nm Nanospectre	Ecart en nm
Silice	143,1	145,8	-2,7
	130,0	138,0	-8,0
	276,3	275,6	0,7
Nitru de Si	173,4	169,6	3,8

Fig.IIIA.12 : Résultats pour les systèmes multicouches.

Un nouvel essai sur quatre tranches de même structure est réalisé. Au point de mesure, cette structure est la suivante :

- _____
- Résine : ép.840 nm, indice 1,64
- _____
- TEOS : ép.840 nm, indice 1,46
- _____
- Nitru de Si : ép.160 nm, indice 1,97
- _____
- Padox : ép.14,5 nm, indice 1,46
- _____
- Substrat de Silicium d'indice 3,8

Fig.IIIA.13 : Exemple de structure des tranches de production.

La gravure s'effectue en trois étapes manuelles. La première élimine la couche de résine. La seconde élimine environ 200 nm de TEOS. Cette gravure se fait pour un

temps fixé par l'utilisateur. La dernière grave le TEOS jusqu'à l'épaisseur d'arrêt de 147 nm.

Le tableau ci-dessous présente les résultats au début de chaque étape. Il permet d'apprécier la reproductibilité des mesures de l'instrument entre les différentes tranches.

	Etape 1 (nm.)	Etape 2 (nm.)	Etape 3 (nm.)
Tranche 1			
Résine	735,7		
Teos	830,3	773,6	642,3
Nitruure		171,4	159,6
Tranche 2			
Résine	753,3		
Teos	840,6	782	651,0
Nitruure		172,9	162,3
Tranche 3			
Résine	749,7		
Teos	839,5	796,9	664,9
Nitruure		167,8	158,5
Tranche 4			
Résine	755,3		
Teos	841,6	791	662,8
Nitruure		170	160,2

Fig.IIIA.14 : Résultats au début de chaque étape.

Les écarts sur la mesure du Teos entre les étapes 1 et 2 s'expliquent par une prolongation volontaire de la gravure. Par contre, les écarts sur la mesure du nitruure entre les étapes 2 et 3 sont inattendus mais reproductibles.

Le tableau, ci-dessous, présente les mesures effectuées après la gravure par le Nanospec pris pour référence :

Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Tranche 4
135 nm.	162 nm.	148,5 nm.	145,1 nm.

Fig.IIIA.15 : Résultats de mesures d'épaisseurs donnés par le Nanospec.

La corrélation entre le Nanospec et l'instrument reste bonne, les différences résultant des phénomènes suivants :

- l'arrêt manuel, compte tenu de la vitesse de gravure (4 à 5 nm.s), est peu précis,
- la mesure de vérification ultérieure n'est pas effectuée au même point pour chacun des deux instruments,

-
- les deux instruments ont chacun leur incertitude de mesure.

III.A.3.2.2.b). Résultat dynamique :

L'interférométrie présente un avantage non négligeable : la mesure in-situ dans la chambre à plasma, ce qui permet :

- un gain de temps, car il n'y a plus de manutention, ni de déplacements, ni d'attente pour effectuer la mesure sur le Nanospectromètre,
- la mesure d'épaisseur pour chaque tranche, ce qui n'est pas le cas actuellement,
- le suivi des gravures in-situ permet la mesure continue de l'épaisseur de couche superficielle afin de déterminer l'arrêt du procédé (Actuellement un temps de gravure est calculé à partir d'un essai effectué sur une tranche "monitor" et est appliqué à tout le lot),
- le logiciel de calcul est mieux adapté aux mesures pour les systèmes multicouches.

III.B). Expérimentation préliminaire sur l'imagerie et le positionnement :

III.B.1). Choix et description du système.

III.B.1.1). Schéma général de l'expérimentation.

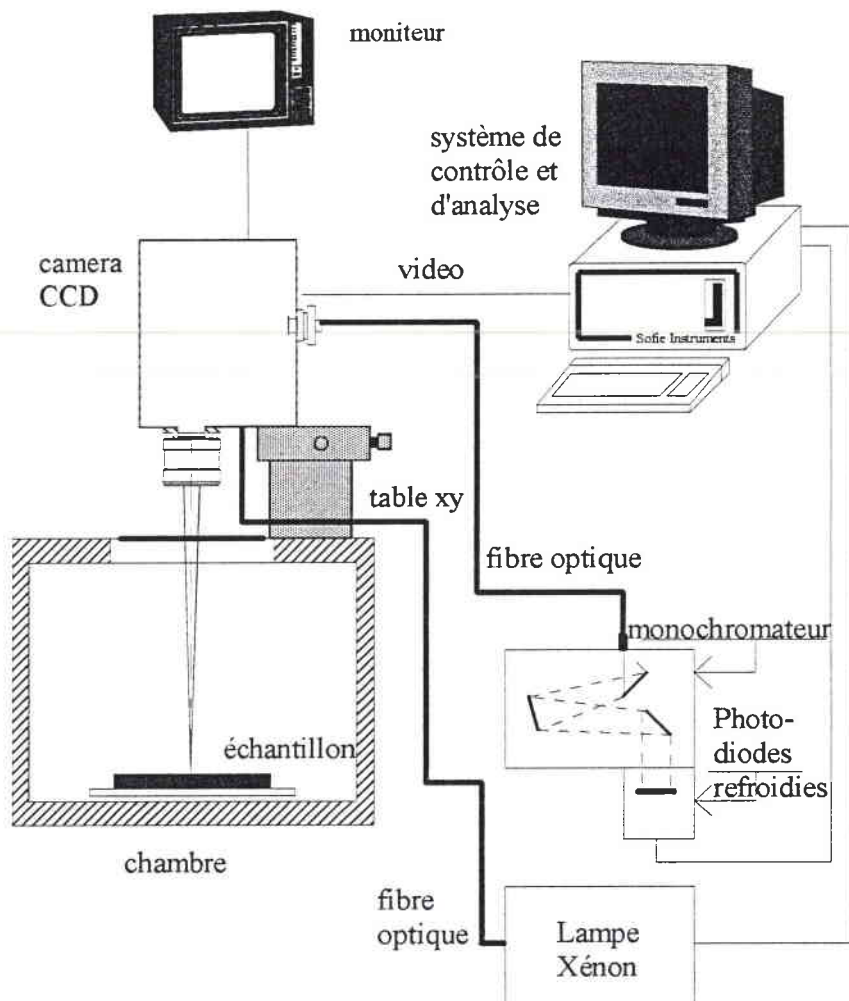


Fig.III.B.1 : Schéma général de l'expérimentation.

III.B.1.2). La caméra.

Des adaptations pour l'imagerie sont nécessaires au niveau de la caméra décrite dans le brevet de la société Sofie afin de pouvoir réaliser des acquisitions et des traitements d'image. Une lampe à filament de 20 Watts, intégrée à la caméra, éclaire la tranche de silicium dont l'image se forme sur la matrice CCD. Un filtre interférentiel rouge est disposé devant la partie sensible pour ne pas la saturer lorsque la source laser "rouge" est utilisée pour l'interférométrie.

La matrice CCD et son électronique est un module monochrome PHILIPS de référence VCM3250/00. Ce module fournit un signal vidéo de type CCIR (625 lignes entrelacées / 50 Hz) et son gain est ajustable. La surface sensible d'un demi pouce carré comporte 512x582 pixels. Sa sensibilité spectrale va de 400 à 1000 nm.

III.B.1.3). La table motorisée deux axes XY.

La table comporte deux axes, équipés de deux moteurs pas à pas (RDM544/100A, Berger Lahr), 5 phases, de 1000 (ou 2000) pas par tour. La course maximale pour chaque axe est de 50 mm. Pour cette course, on dénombre environ 47 000 pas.

La précision de déplacement est par conséquent de $1\mu\text{m}$. Le tableau, ci-dessous, rassemble les principales caractéristiques des moteurs utilisés.

Nombre de pas (demi-pas / pas entier)	2000 / 1000.
Pas angulaire (demi-pas / pas entier)	$0,18^\circ / 0,36^\circ$.
Couple Max.	10 Ncm.
Couple de maintien	11 Ncm.
Moment d'inertie du rotor	$0,024 \text{ kgcm}^2$.
Erreur de positionnement par pas	$0,05^\circ$.
Fréquence de départ max. (demi-pas / pas entier)	7 / 3,5 kHz.
Courant nominal par circuit	0,27 A.
Résistance par circuit	22 Ω .
Constante de temps de la montée du courant	1 ms.
Charge radiale sur l'arbre	15 N.
Masse	0,25 Kg

Fig.IIIB.2 : Principales caractéristiques des moteurs pas à pas RDM544/110A.

Des cartes de puissance D225 de Berger Lahr alimentent et gèrent le fonctionnement de ces moteurs. Leur rôle est de convertir les commandes de déplacement digitales en courant pour les différentes phases du moteur pas-à-pas pour que celui-ci exécute les fonctions désirées. La carte de commande établit ainsi le lien entre la partie commande et le moteur pas-à-pas.

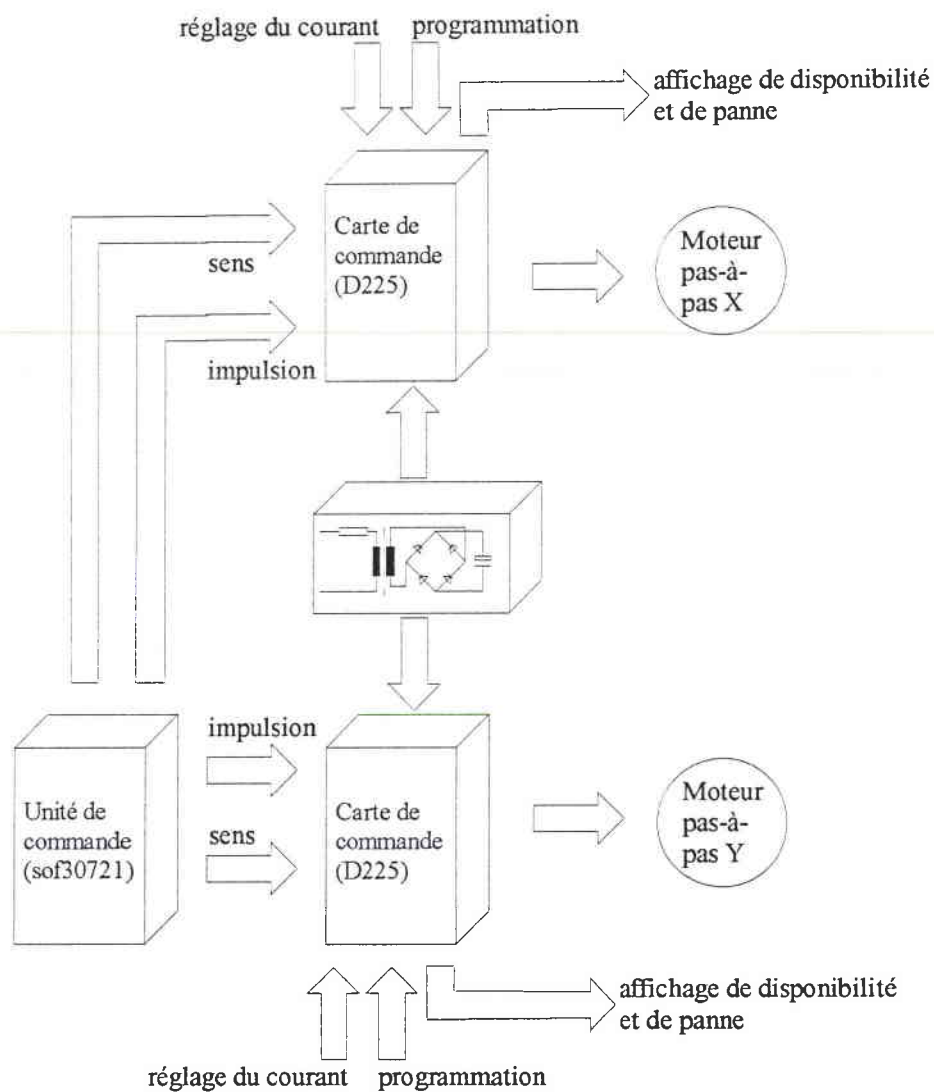


Fig.IIIB.3 : Schéma du système de commande et de contrôle des moteurs pas-à-pas.

Le tableau suivant donne quelques spécifications de ces cartes.

Tension de service	24..35 volts DC +/- 10%.
Absorption de courant (avec moteur)	2 A maxi.
Dissipation de puissance de la carte de commande	8 W maxi.
Condensateur de charge	7,5 μ F min.
Plage de courant nominal	0,21..1,0 A , 55mA/étage de branchement
Gamme de fréquence	0..100 kHz.
Tension de commande	24 V., TTL (3,5 V. à 5 V.)
Abaissement automatique du courant à l'arrêt du moteur	70 % I_{nom} .
Température de service	0..55 °C.
Dimensions	100 mm X 160 mm X 18mm
Poids	100g.

Fig.IIIB.4 : Principales caractéristiques de la carte de commande D225.

Le pilotage de cette table est assuré par des procédures en langage C destinée au microcontrôleur 80 C 31 et qui sont téléchargées dans notre carte SOF30721 au moment de l'initialisation du système.

Les principales procédures utilisées sont :

- reconnaissance des butées gauches,
- reconnaissance des butées droites,
- initialisation et comptage des pas moteur,
- déplacement absolu,
- position en pas moteur de la table,
- envoi de la configuration et du type de la table,
- téléchargement de la courbe d'accélération des moteurs, linéaire ou sinusoïdale.

L'accélération des moteurs, suivant des rampes linéaires, au début du projet, s'est révélée insatisfaisante pour les performances de rapidité de déplacement par rapport au poids déplacé. Aussi, une étude particulière a été menée sur l'accélération de ces moteurs [19].

III.B.1.4). La carte d'acquisition vidéo.

La carte d'acquisition vidéo se place dans un connecteur du bus PCI de la carte mère, permettant ainsi le transfert en temps réel. On vérifie s'il n'y a pas de conflit d'interruptions. Comme l'ordinateur ne dispose pas de carte vidéo permettant le transfert direct en mémoire d'affichage, on se sert d'un tampon en mémoire RAM.

Cette carte est accompagnée d'une bibliothèque en langage C de fonctions MIL (Matrox Image Library). L'avantage est un code commun à toutes les cartes MATROX. De ce fait, un changement de matériel (carte d'acquisition, de caméra,...) n'entraîne qu'une recompilation des fichiers sources après avoir mis à jour le fichier des configurations.

Les fonctions utilisées sont :

- initialisation du système et de la mémoire,
- acquisition d'images,
- affichage et modifications de la table de LUT,
- calcul d'histogramme des niveau de gris,
- égalisation d'histogramme,
- paramétrages et recherche de motifs,

- stockage et chargement d'images et de motifs,
- libération du système et de la mémoire,

III.B.2). *Le positionnement.*

Après l'arrivée de la tranche de silicium dans la chambre de gravure, le spot doit être placé sur un site particulier destiné à la mesure. Le temps imparti au positionnement et à la première mesure d'épaisseur doit être du même ordre de grandeur que la phase dite de stabilisation, qui est de l'ordre de 10 secondes. Pour un lot de fabrication, une image de référence est choisie, le site destiné à la mesure est inclu dans cette image. Pour des tranches du même lot, on fait l'acquisition d'une image et la recherche de la position du motif. On transmet à la carte de pilotage de la table XY, les écarts avec la position de référence afin de placer correctement le spot pour la mesure. Il faut établir une relation entre les dimensions des pixels et les pas moteurs de la table par un calibrage. Des essais préliminaires sur un lot de fabrication ont montré que la précision du robot est telle que le site se trouve toujours dans le champ de vision de la caméra.

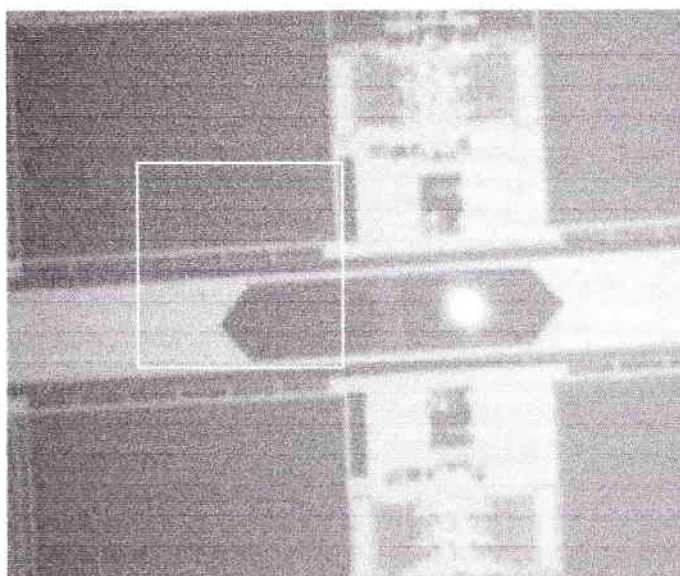


Fig.IIIB.5 : Exemple d'image de référence.

III.B.2.1). Le programme

Le but n'est pas de fournir une application fermée, mais plutôt un module avec différentes fonctions utilisant le traitement d'images et la motorisation de la table XY. Ce module doit s'intégrer dans le programme de gestion de l'interféromètre et dans le produit final de la société Sofie. Les paramètres sont accessibles afin de pouvoir faire des études en usine et de les adapter aux différentes situations. Les résultats sont contrôlés à chaque étape. La programmation est réalisée en Visual C sous un

environnement Windows. Les différentes fonctions sont décrites par leur action et non par leur code.

Le tableau, ci-dessous, donne l'architecture générale du programme. On reprendra ses différents éléments dans les paragraphes suivants. Trois sous-menus sont réalisés pour appeler les fonctions relatives à la caméra, à la table XY ou au positionnement. De cette façon, on scinde la programmation du traitement d'images et la motorisation, puis on élabore des procédures faisant appel aux deux groupes de fonctions précédentes pour le positionnement.

Le programme est du type "orienté objet". On définit une classe CImage avec ses variables et ses fonctions pour l'imagerie et une autre Cmotorpi pour la motorisation. Les appels de menus se font dans la classe CView, où sont déclarées les variables globales. Chaque appel du menu est réalisé par des appel successifs de fonctions appartenant aux classes. Pour la définition des paramètres, on utilisera des boites de dialogue.

-Caméra	-Initialisation	-Par défaut -Modification des niveaux de gris -Modification de l'histogramme des niveaux de gris
	-Acquisition	-Continue -D'une image
	-Motif à rechercher	-Définition des paramètres -Définition de la position -Recherche du motif
	-Bibliothèque d'images	-Import -Export image acquise -Export image affichée

-Table XY	-Initialisation	
	-Position	
	-Déplacement	-Avec image -Sans image
	-Calibrage pixel-pas	-Rapide -Fin

-Positionnement	-Initialisation complète	
	-Définition du motif	
	-Bibliothèque de motifs	-Import -Export
	-Positionnement	-Après déplacement manuel -Après déplacement aléatoire -Dans les limites de précision

Fig.IIIB.6 : Menus du programme.

⇒ L'initialisation de la caméra :

L'architecture de la bibliothèque demande une initialisation de l'application, du système (type de carte), de l'affichage (ici mode VGA), de la caméra avec les paramètres par défaut. Les acquisitions d'images créent un conflit d'interruptions sur le bus PCI. Pour l'éviter, on ajoute à l'initialisation le paramètre `M_NO_INTERRUPT` afin que la carte ne génère plus d'interruptions. Puis les dimensions en pixels de la matrice CCD sont acquises dans le but de créer des tampons de taille identique pour les images. Ensuite une acquisition est effectuée pour vérifier le bon fonctionnement de la caméra.

Deux boîtes de dialogue peuvent être appelées pour modifier la table de LUT d'affichage. Une première, affichant cette table, permet de changer la valeur de chaque niveau de gris de la table de LUT d'acquisition en une valeur comprise entre 0 et 255.

La deuxième boîte de dialogue, affichant l'histogramme de l'image acquise, permet de modifier l'affichage par une méthode d'égalisation de l'histogramme. Ces modifications permettent d'ajuster la dynamique et le contraste de l'image affichée. Ces fonctions servent à la mise en route de l'appareillage et à l'analyse d'images posant des problèmes.

⇒ L'acquisition d'une image :

L'image est acquise en mémoire et son affichage peut être demandé ou non. La fonction d'acquisition continue MIL entraîne des problèmes au niveau des interruptions logicielles, de la gestion du clavier et celle de la souris. C'est pourquoi, on boucle sur l'acquisition unique d'une image. Cette solution convient aussi pour l'intégration dans le programme principal, car il faut libérer le processeur pour les autres tâches. Pour contrôler l'image acquise, on recherche le niveau de gris le plus élevé dans l'image. En dessous d'un certain seuil (environ 15), un problème de caméra ou de câble vidéo est signalé. D'autres seuils sont à définir en fonction des images prise sur le site. La présence du cache sur l'objectif de la caméra est décelé si la valeur est inférieure à 80.

L'image provenant de la caméra est toujours mise dans la même zone mémoire. Elle est copiée dans une autre destinée à l'affichage par l'intermédiaire de la table de LUT avec, s'il y a lieu, les résultats de la recherche.

⇒ La recherche de motifs :

Une boîte de dialogue permet de modifier tous les paramètres du motif et de sa recherche. La zone réservée à l'acquisition est utilisée par ces fonctions.

Le motif est choisi dans une image de référence à l'aide d'un cadre ayant ses dimensions, qui est déplacé à l'aide des touches H (Haut), B (Bas), D (Droite), G (Gauche). Puis on alloue de la mémoire pour le motif normalisé. On paramètre la vitesse et la précision de la recherche afin que le logiciel détermine la stratégie de recherche dans le calcul préliminaire. Une première recherche est effectuée de suite sur l'image de référence. Un écart entre la position trouvée et celle de référence invalide le choix.

Dans la mémoire allouée aux résultats de la recherche, une classification par ordre décroissant du pourcentage de ressemblance est effectuée. Le premier de la liste sert à calculer l'écart en pixels par rapport à la position de référence.

Les résultats de la recherche sont affichés en incrustation dans l'image, avec un carré de 10 x 10 pixels pour représenter l'échelle. Dans le produit final, le résultat ne sera plus affiché.

⇒ La bibliothèque d'images :

Notre bibliothèque d'image utilise simplement les fonctions de sauvegarde et de lecture des fichiers d'images sous le format TIF, afin de pouvoir les exploiter dans d'autres programmes. L'image acquise par la caméra, ou l'image affichée à l'écran peuvent être stockées sur le disque.

⇒ Initialisation de la table XY :

Elle effectue, d'abord, le téléchargement du programme de gestion de la carte SOF 30721. Dans la même procédure, on effectue sa configuration et l'initialisation proprement dite qui va compter le nombre de pas maximum en X et en Y. Un test est effectué sur ces valeurs mises dans des compteurs pour détecter des pannes éventuelles de la table. Les positions en X et en Y sont connues par la lecture de ces compteurs, qui sont mis à jour après chaque déplacement.

⇒ Les déplacements :

Une première fonction permet les déplacements de la table sans image à l'aide d'une boîte de dialogue. On utilise les pas moteur comme unité et l'incrément peut être de 10, 100 ou 1000 pas. Les barres de défilement permettent de choisir la direction.

Une position absolue est atteinte en indiquant ses coordonnées dans les zones respectives. Une deuxième fonction sert aux déplacements avec image à l'écran à l'aide des touches H, B, D, G. Le pas de progression est modulé par les touches + ou -.

⇒ Le calibrage Pixels-pas moteur :

Elle est simultanée sur les deux axes. Les écarts par rapport à la position de référence sont donnés en pixel, d'où la nécessité de déterminer le rapport de proportionnalité avec les pas moteur. Comme celui-ci dépend de l'appareillage, un calibrage est effectué soit en effectuant une recherche d'un motif avant et après déplacement d'un certain nombre de pas en X et en Y, soit en répétant cette opération plusieurs fois pour obtenir une droite de régression.

Le motif est déplacé vers le coin inférieur gauche du champ de vision de la caméra. Puis les déplacements en pas moteur se font vers le coin supérieur droit. Les pentes sont calculées pour les deux axes et validées si elles sont dans les limites prédéfinies. Des problèmes de déplacement ou de recherche de motif sont détectés en fixant un seuil pour le coefficient de corrélation de la droite de régression.

⇒ La définition du motif pour le positionnement :

Ces actions sont à répéter pour chaque nouveau lot de tranche de silicium. Une Recherche visuelle d'un site de mesure est effectuée en premier lieu en déplaçant la table à l'aide des touches définies. Puis le spot d'analyse est centré sur le site de mesure toujours en déplaçant la table. Un motif est ensuite choisi en déplaçant le cadre qui le délimite à l'écran. Dans le choix, il faut exclure deux zones pour être sûr de retrouver le motif pour chaque tranche du lot : Une première est constituée par une bordure autour de l'image d'une largeur équivalente à une fois les dimensions du motif, compte tenu de la précision du robot, car il ne faut pas être trop près du bord pour que le motif soit entièrement présent dans chaque image. Une deuxième représente la zone de mesure avec son spot, car pour chaque tranche présentée, la position relative du spot par rapport à la zone de mesure change, on ne retrouvera pas le motif représentant une partie de la zone de mesure avec le spot centré. Il n'est présent qu'une fois le positionnement réalisé.

On valide le choix par une première recherche sans déplacement de la table. Si les coordonnées du motif trouvé ne diffèrent pas de celles du motif choisi, elles sont stockées avec le numéro du lot et la position absolue de la table XY pour le lot de tranche silicium. Dans le cas contraire, il faut choisir un autre motif.

⇒ la bibliothèque de motifs :

En fabrication, le lot peut changer d'une tranche de silicium à l'autre, aussi il est nécessaire de créer une bibliothèque de motifs. Des fichiers de motifs sont créés, l'image du motif est stockée avec ses paramètres de recherche. On y adjoint un fichier contenant la position de la table XY, ainsi que celle du motif trouvé dans l'image de référence après la première recherche. Ces derniers paramètres peuvent varier suite à

une maintenance (réglage du bras du robot, déplacement de la caméra....) et la bibliothèque avec ses données devient obsolète. Pour éviter tout le travail de ressaisie, on détermine la position d'un motif d'une tranche avant et après intervention humaine, et les écarts mesurés en X et en Y servent à corriger les motifs appartenant à la bibliothèque.

Le chargement d'un fichier entraîne un déplacement de la caméra conformément aux coordonnées stockées avec le motif.

⇒ Le positionnement :

Lors de l'introduction d'une nouvelle tranche de silicium dans la chambre, le spot de mesure doit être amené sur un site bien précis en déplaçant la caméra à l'aide de la table motorisée. Si le bras motorisé, qui manipule les tranches, était assez précis, le simple stockage de la position de la table suffirait, mais ce n'est pas le cas. L'imagerie permet de corriger la position de la caméra pour chaque tranche. En connaissant le numéro du lot présenté, le fichier du motif correspondant est chargé et le site de mesure est placé dans le champ de vision de la caméra à l'aide des données de référence. Puis une recherche du motif est effectuée, l'écart par rapport à l'image de référence est communiqué en paramètre pour le déplacement relatif de la table XY. Une vérification est faite par une nouvelle recherche et déclenche si nécessaire un nouveau positionnement.

III.B.2.2). Paramétrage des fonctions :

III.B.2.2.1). L'image :

On récupère les dimensions de la matrice CCD par l'intermédiaire d'une fonction MIL au moment de l'initialisation pour créer des images de taille identique. Mais on remarque une différence entre le nombre de pixels de la matrice CCD (512x582 en mode CCIR) et le nombre de pixels de l'image (768x576). Des facteurs de conversion verticaux et horizontaux sont appliqués afin d'adapter la taille de l'image codé par la caméra à celle de l'écran. Ces facteurs sont multipliés ou divisés par des puissances de deux, si on choisit d'agrandir ou de diminuer la taille de l'image affichée en utilisant la fonction "zoom" proposée par le logiciel.

III.B.2.2.2). Le motif :

La taille du motif est bornée par le logiciel entre une limite inférieure de 50 pixels et la moitié de l'image en hauteur ou en largeur. Il faut garder à l'esprit que sa taille influe beaucoup sur le temps de calculs. Le choix d'un petit motif n'est pas toujours judicieux, car on commence alors au niveau 0 de la recherche hiérarchisée. Un motif trop grand demande trop de calculs. Un motif de 128x128 pixels convient pour une recherche sur toute l'image. On peut diminuer sa taille si on restreint la zone de recherche par le logiciel, mais on augmente le risque de ne pas retrouver le motif. Le choix le plus important est le motif lui-même, c'est là qu'intervient l'opérateur. Il faut prendre en considération une zone remarquable de l'image en évitant absolument

les zones constituées par le site de mesure et les bords de l'image. Le motif doit être unique dans l'image, il est donc judicieux de choisir une zone présentant plusieurs discontinuités horizontales et verticales. La recherche d'un motif constitué par l'image du spot de mesure peut servir à détecter une panne d'éclairage de celui-ci.

III.B.2.2.3). La recherche :

En premier lieu, il faut choisir les paramètres suivants :

- La vitesse de recherche : On peut choisir entre quatre options allant de *rapide* à *très lente*. Ce paramètre intervient pour une grande part dans la détermination de la stratégie de recherche : On utilise la vitesse *rapide* pour éviter les calculs superflus. On réduit la vitesse si l'image est de qualité médiocre ou si des irrégularités dans les résultats de la recherche apparaissent. La précision dépend très peu de ce paramètre.

- La précision de la recherche en pixel : Elle peut être de +/- 0,5, +/-0,25 ou +/- 0,125 pixel. Il est étonnant que ce paramètre soit exprimé en fraction de pixel. En effet, le coefficient de corrélation le plus élevé ne peut correspondre qu'à des coordonnées entières. Mais en utilisant les résultats des pixels environnants pour une modélisation du pics, la valeur et la position du maximum de corrélation seront calculés. Si le coefficient de corrélation est important, l'incertitude est fixé à 0,25 pixel. Plus la précision sera grande, plus la recherche sera longue, mais l'image devra être très peu bruitée (moyenne sur plusieurs images afin de réduire le bruit) et aucune rotation par rapport à l'image de référence n'est admise.

- Le seuil de ressemblance en % : 100% correspond à une superposition parfaite et 0% à l'absence de corrélation, 80% est un choix raisonnable. La ressemblance avec le motif dépend beaucoup de la qualité de l'image et la limite doit être fixée après des essais successifs. Pour cela, le nombre de motifs à trouver n'est pas imposé et le seuil est fixé à 60% par exemple. La recherche fournit tous les motifs ayant un taux de ressemblance supérieure à 60% et le premier de la liste est celui avec le taux le plus fort.

- Le seuil de certitude en % : S'il est atteint, la recherche est arrêté car on est sûr d'avoir trouvé le motif. Il devrait être normalement de 100%, mais il est rarement atteint à cause du bruit et de la distorsion de l'image lors des acquisitions. On augmente aussi le temps de recherche, car on oblige le logiciel à scruter toute la zone de recherche afin de trouver la meilleure corrélation. Une valeur légèrement inférieure à 100% sera choisie afin de gagner du temps de calcul.

Les autres paramètres de la recherche sont pris par défaut ou fixés par le logiciel : la zone de recherche est toute l'image, tous les pixels du motif sont à prendre en considération dans la recherche, le nombre de motifs à trouver qui est égal à 1 par défaut et la position du motif trouvé correspond au centre du motif.

III.B.2.2.4). Les déplacements :

La carte SOF 30721 est initialisée pour être utilisée avec la caméra et la table XY. On déclare que les moteurs pour l'axe X et l'axe Y sont présents. L'accélération pour les moteurs est du type linéaire. Au cours de l'initialisation, le nombre de pas moteur entre les butées mécaniques de chaque axe est déterminé. Cette valeur doit être supérieure à 40000, sinon une alarme est déclenchée en indiquant un problème sur les moteurs.

III.B.2.2.5). Le positionnement :

Les résultats montrent que plusieurs positionnements successifs sont nécessaires pour atteindre la précision requise d'un pixel. Le nombre d'itérations pour l'atteindre est fixé à 5, au delà une alarme signale l'échec.

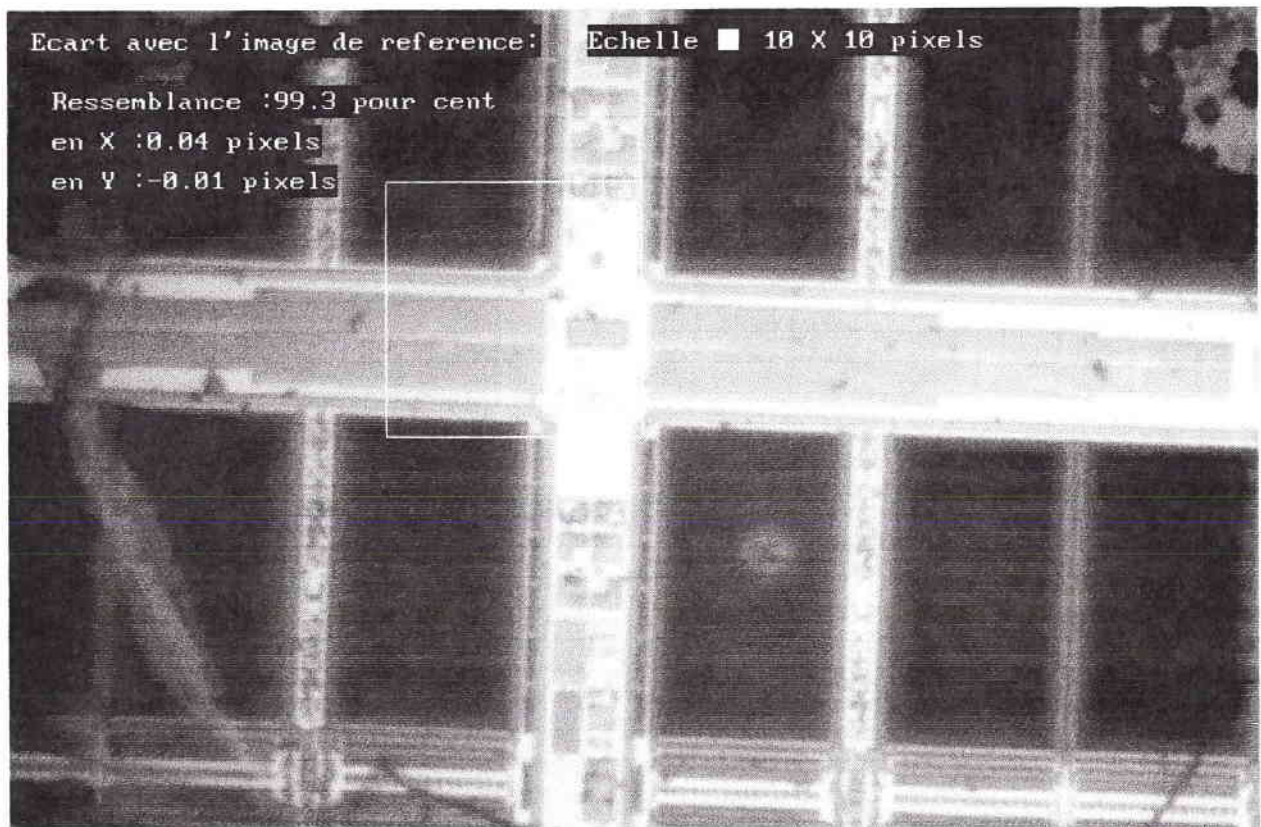


Fig.III.B.7 : Exemple de résultats après recherche et positionnement.

III.B.3). Analyse des résultats :

III.B.3.1). Chronométrage des fonctions :

Un temps de 10 secondes est imparti pour le positionnement et pour effectuer la première mesure d'épaisseur. La phase de positionnement doit être aussi rapide que possible. Il faut noter que les temps d'exécution des fonctions relatives à l'imagerie

sont négligeables par rapport à ceux nécessaires de déplacements des axes de la tables XY.

- Initialisation de l'imagerie : < 100ms
- Recherche d'un motif de 128x128 pixels sur toute l'image : <100ms. La société Matrox donne 39,5ms pour une recherche d'un motif 128x128 dans une image 512x512 avec un processeur Pentium cadencé à 120Mhz sous Windows NT. On peut diminuer ce temps en limitant la zone de recherche. Cette possibilité est envisagée si des tranches d'un même lot sont présentées successivement.
- Initialisation des moteurs : 75 s.
- Calibrage rapide : 3 s. (sans le choix du motif).
- Calibrage fin : 5 s. (sans le choix du motif).
- Positionnement après un déplacement de 100 pixels : 1 s.
- Chargement d'un motif, prépositionnement, recherche et positionnement : 2 s.

III.B.3.2). Précision de la recherche :

Après l'acquisition d'une image de référence et le choix d'un motif dans celle-ci, on mesure les écarts de position pour plusieurs recherches successives sur cette même image de référence. Le coefficient de ressemblance dépend du motif et du bruit dans l'image. Ces résultats sont conformes aux données du constructeurs, qui en négligeant ces facteurs et compte tenu de la précision du calcul pour le coefficient de ressemblance donne une précision de 0.05 pixel. Dans la pratique, le dixième de pixel est une bonne limite. C'est pourquoi la limite du paramètre de la fonction MpatSet Accuracy est de 1/8 de pixel.

Coefficient de Ressemblance (%)	Ecart en X (pixels)	Ecart en Y (Pixels)
99,5	-0,01	-0,02
99,5	0,00	-0,04
99,5	-0,01	-0,04
99,5	-0,04	-0,07
99,5	-0,02	-0,07

Fig.IIIB.8 : Précision de la recherche.

En faisant une recherche du motif sur une image rendue floue, on constate une diminution du coefficient de ressemblance de 5 à 15 % et des écarts pouvant aller

jusqu'à 10 pixels. La méthode pyramidale atténue justement les effets du flou, le niveau 0 de la recherche hiérarchisée est rarement utilisé avec un paramétrage normal. Une mise au point correcte de l'image est gage d'une bonne précision pour la position et d'un facteur de ressemblance correct.

III.B.3.3). Dimensions d'un pixel :

Afin de se rendre compte de la taille d'un pixel et de l'image affichée à l'écran, la table XY motorisée a été remplacée par une table manuelle graduée. Les mesures ont été effectuées pour un certain grossissement de la caméra, mais il sera toujours de cet ordre de grandeur (objectif standard 50 mm à 15 cm de la tranche). La fonction de recherche de motif est utilisée avec un seuil de ressemblance de 80 %. On choisit un motif de 128x128 pixels dans l'image, on effectue une première recherche pour obtenir les coordonnées de référence en pixels. On se déplace ensuite de 500 µm en X et en Y, on détermine les écarts de coordonnées par une recherche du motif. Puis on revient à la position initiale pour vérifier les coordonnées de référence et la précision de la table XY.

	Déplacement en X (pixels)	Déplacement en Y (pixels)	Coefficient de ressemblance %
Position initiale	-0,1	-0,0	88,8
Déplacement de 500µm en X et Y	122,0 121,9	120,5 119,9	88,4 84,3
Retour à la position initiale	-0,1 -0,2	0,0 -0,1	88,7 88,9

Fig.IIIB.9 : Mesures de la dimension d'un pixel.

Les dimensions du pixels sont 4,10 µm de largeur et 4,15 µm de hauteur. On peut admettre que l'acquisition et l'affichage d'une image n'entraînent qu'une déformation réduite (pixel pratiquement carré). La taille de l'écran est de 640x480 pixels soit 2,6x2,0 mm². Le champ de vision de la caméra est de 768x576 pixels soit 3,1x2,4 mm².

III.B.3.4). Effets de la rotation de la tranche :

La rotation du motif ou de l'image influent beaucoup sur le résultat de la recherche. Elle est la cause essentielle d'un échec. Son influence sur le coefficient de ressemblance va être étudiée. La rotation de l'image pourrait être obtenue par une simulation logicielle à l'aide d'une fonction de la bibliothèque MIL. Mais on fait appel à des méthodes d'interpolation pour calculer les niveaux de gris de chaque pixels de la nouvelle image. Ce calcul influe en plus sur le résultat. Aussi nous posons la tranche de silicium sur une platine de rotation graduée au centième de degré. Le centre de rotation sera placé dans le champ de vision de la caméra afin de limiter la translation de l'image.

Rotation (degré)	Coefficient de ressemblance (%)
0,00	99,4
1,00	98,9
2,00	96,3
3,00	94,3
4,00	89,8
5,00	87,2
6,00	83,2
7,00	80,3
8,00	75,9
9,00	72,5
10,00	68,5
0,00	98,5

Fig.IIIB.10 : Recherche du motif en fonction de la rotation de l'image.

Pour d'autres motifs choisis sur la tranche de silicium, on retrouve les valeurs du tableau, ci-dessus, à 0,1% près. Il est sûr, qu'il faudrait reprendre ces tests avec d'autres types d'images plus ou moins nettes. En fabrication, on tolère une rotation maximum de 1°, ce qui entraîne une diminution de 1% du coefficient de ressemblance, ce qui est acceptable.

Ce seuil devra surtout être choisi en fonction de l'espace en pixels qui sépare le bord du spot et celui du site de mesure et l'éloignement du motif à rechercher. Par exemple, pour 5 pixels entre les bords et 300 pixels entre le centre du spot et le centre du motif, on ne peut accepter qu'une rotation de 1° maximum par rapport à l'image de référence. On remarque que le fait d'abaisser le seuil de ressemblance nous oblige à admettre une plus grande tolérance sur la rotation de la tranche de silicium. Le positionnement peut être erroné, car la rotation du motif implique aussi une translation de sa position. Il n'est pas anodin de diminuer le seuil de ressemblance pour trouver un motif dans une image.

III.B.3.5). Calibrage pixel - pas moteur :

Le calibrage est propre à chaque table XY et devra être répété à chaque initialisation. Une valeur par défaut peut être utilisée lors de la mise en route. Une mise à jour du fichier d'initialisation est faite à la sortie de la procédure de calibrage. La relation linéaire entre les pixels et les pas moteur permet de définir un coefficient de conversion appelé *pente* exprimé en pas/pixel. La pente est déterminée pour les axes X et Y.

Pente X (pas / pixel)	Pente Y (pas / pixel)
8,6106	-8,4561
8,9152	-8,4342
8,6393	-8,4099
8,6870	-8,4117
8,5908	-8,4098
8,6009	-8,4268
8,6033	-8,4152
8,6074	-8,4571
8,5742	-8,4173
8,6082	-8,4782
Moyenne : 8,6437	Moyenne : -8,4317
Ecart type : 0,1002	Ecart type : 0,0241

Fig.IIIB.11 : Calibrage rapide.

Pour le calibrage rapide, on recherche un motif avant et après un déplacement en X et en Y de 1000 pas. La différence entre les positions du motif permet de calculer les pentes. Pour obtenir les résultats du tableau, ci-dessus, on a changé de motif à chaque fois et il n'y a pas eu d'échec au niveau des recherches. Ces premiers résultats permettent de déterminer les limites haute et basse de la pente pour chaque axe. Si le calibrage donne une pente en dehors de ces limites, on peut envisager une défaillance de la table XY. Pour l'axe Y, un déplacement de l'axe dans un sens entraîne un déplacement du motif dans le sens contraire, d'où une pente négative.

Pour le calibrage fin, on choisit un motif dont la position est prise pour origine. Puis on détermine, sa position après un déplacement de 500 pas en X et en Y. Cette opération est répétée de façon à obtenir un déplacement total de 2500 pas dans les deux directions. Ces résultats permettent d'établir, pour chaque axe, une droite de régression, dont on calculera la pente pour obtenir le facteur de conversion et le coefficient de corrélation. Il est nécessaire de fixer une limite inférieure aux coefficients de corrélation en dessous de laquelle on rejette le calibrage. Des échecs successifs indiquent une panne de l'appareil. Pour le tableau, ci-dessus, les coefficients sont tous égaux à 1,0000 et il n'y a pas eu d'échec au niveau des recherches.

Pente X (pas / pixel)	Pente Y (pas / pixel)
8,6260	-8,4834
8,6537	-8,4600
8,6194	-8,4193
8,5826	-8,4662
8,6275	-8,4647
8,6334	-8,4773
8,6613	-8,4531
8,6709	-8,4548
8,6711	-8,4816
8,6464	-8,4855
Moyenne : 8,6392	Moyenne : -8,4646
Ecart type : 0,0273	Ecart type : 0,0198

Fig.IIIB.12 : Calibrage fin.

Connaissant la précision d'un pas moteur ($0,5\mu\text{m}$), les dimensions du pixel sont déduites à partir de pentes. On obtient $4,32\mu\text{m}$ de largeur et $4,23\mu\text{m}$ de hauteur. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus avec la table manuelle, sachant que la distance entre l'objectif et la tranche a varié.

En analysant les deux procédures de calibrage, on constate une dispersion plus grande des pentes dans le premier type, surtout pour le moteur X. La deuxième fonction représente déjà une moyenne de 5 calibrages du premier type et de par ce fait la dispersion est plus faible. Compte tenu des écarts-types, un déplacement de 100 pixels est effectué à un quart de pixel près. On ne pourra conclure qu'après les tests sur la reproductibilité.

III.B.3.6). Reproductibilité du positionnement :

On étudie en premier lieu le repositionnement en fonction de la distance par rapport à la position de référence. On calibre les pentes de déplacements moteurs et on choisit un motif de 128×128 pixels. Puis on effectue un déplacement en pixels vers le haut de l'image et on appelle la fonction de positionnement du programme. Les résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous. Les écarts tant en pixels qu'en pas moteur ne sont pas exactement proportionnels aux déplacements comme le laisse prévoir les résultats du calibrage. Compte tenu de la reproductibilité propre à la recherche ($< 0,1$ pixel), les écarts proviennent en majorité des déplacements. On peut distinguer la conversion pixels en pas moteur et la variation de l'accélération linéaire des moteurs. Les variations de la pente de calibrage ne devrait pas donner des écarts aussi importants. C'est l'accélération des moteurs qui entraîne cet aspect aléatoire des résultats. Les calibrages sont faits pour une certaine distance qui inclut le paramètre accélération. Un calibrage fait avec des distances variables ne résoudrait pas le problème. Mais avant d'envisager d'autres modes d'accélération plus adaptés, il est nécessaire de faire les tests qui suivent.

Déplacement (pixel)	Coefficient de ressemblance	Ecart X (pixel)	Ecart Y (pixel)	Ecart X (pas mot.)	Ecart Y (pas mot.)
0	99,5	0,01	0,09	0	-1
20	98,9	0,19	0,68	2	-3
	98,4	0,35	1,12	2	-4
40	99,1	0,42	0,48	4	0
	99,5	0,43	-0,14	4	0
60	99,4	0,60	-0,22	6	3
	99,3	0,63	-0,23	6	4
80	98,7	0,92	-1,07	8	12
	98,6	0,94	-1,04	8	12
100	98,6	0,94	-1,13	9	13
	98,6	0,94	-1,10	9	13

Fig.IIIB.13 : Positionnement après déplacements dans une direction.

Après avoir calibré la table XY, un motif est choisi et repositionné après un déplacement de 100 pixels dans différentes directions. Les mouvements sont repérés par rapport aux bords de l'image vers lequel le motif est amené: haut, bas, droite et gauche. Les résultats sont reportés dans le tableau, ci-dessous. Les écarts sont les plus faibles pour les direction bas-gauche et haut-droite. Or, c'est le déplacement utilisé pour les calibrages : on part du coin inférieur gauche pour aller vers le coin supérieur droit. Le calibrage séparé des deux moteurs serait une solution, mais le sens intervient aussi.

Direction de déplacement	Coefficient de ressemblance	Ecart X (pixel)	Ecart Y (pixel)	Ecart X (pas mot.)	Ecart Y (pas mot.)
Haut	98,2	0,92	-1,82	11	14
	98,2	1,13	-2,09	11	16
	98,2	1,15	-2,11	11	16
Haut et droite	99,4	-0,03	-0,26	-1	3
	99,2	-0,33	-0,29	-3	3
	98,9	-0,46	-0,34	-4	3
Droite	97,1	-1,47	2,06	-15	-19
	97,7	-2,04	1,69	-17	-16
	98,0	-2,07	1,51	-17	-15
Bas et droite	99,6	-3,11	4,07	-27	-35
	99,4	-2,94	4,00	-29	-34
	99,6	-3,32	3,99	-29	-34
Bas	97,6	-1,05	1,87	-12	-21
	98,0	-1,18	1,48	-13	-20
	97,9	-1,16	1,61	-13	-20
Bas et gauche	99,8	0,57	0,22	3	-7
	99,7	-0,39	0,14	1	-7
	99,6	0,11	0,01	1	-7

Direction de déplacement	Coefficient de ressemblance	Ecart X (pixel)	Ecart Y (pixel)	Ecart X (pas mot.)	Ecart Y (pas mot.)
Gauche	97,4	1,73	-1,81	14	7
	98,0	1,46	-2,12	12	9
	97,9	1,52	-2,09	12	9
Haut et gauche	99,3	3,37	-3,86	28	27
	99,1	3,29	-3,99	28	28
	99,1	3,27	-3,98	26	28

Fig.IIIB.14 : Positionnement après déplacement dans différentes directions.

Précision de la fonction de positionnement finale :

Plutôt que d'envisager des solutions complexes pour minimiser les écarts, il est plus judicieux de répéter la fonction de positionnement jusqu'à être dans les limites acceptables. On converge vers la position de référence, s'il n'y a pas de problèmes techniques.

Un motif est choisi, puis il est déplacé de 50 pixels vers le haut. On utilise ensuite la procédure de positionnement plusieurs fois de suite. A chaque itération, on obtient les écarts avec les positions de référence du motif dans l'image et de la table XY. Les résultats du tableau, ci-dessous, convergent vers la précision de la recherche du motif. Le déplacement n'intervient plus à partir de la troisième boucle. En effectuant des déplacements aléatoires en distance et direction, un écart maximal de 3 pas moteur est mesuré au bout du troisième positionnement.

Itération	Coefficient de ressemblance	Ecart X (pixel)	Ecart Y (pixel)	Ecart X (pas mot.)	Ecart Y (pas mot.)
0	98,2	1,66	-2,03	11	16
1	99,5	-0,44	0,49	-3	-3
2	99,1	0,08	0,17	0	-1
3	99,0	-0,12	0,07	-1	0
4	98,9	0,00	0,05	0	0
5	99,8	-0,02	0,04	0	0

Fig.IIIB.15 : Positionnement successifs.

La procédure définitive boucle sur la fonction de recherche et déplacement jusqu'à ce que l'écart par rapport à la référence soit un pixel. Si au bout de 5 boucles, cette précision n'est pas atteinte, un échec de recherche est signalé. Les résultats suivants montrent la précision de cette procédure; deux motifs sont chargés alternativement et le positionnement est effectué.

Motif	Coefficient de ressemblance	Ecart X (pixel)	Ecart Y (pixel)	Ecart X (pas mot.)	Ecart Y (pas mot.)
1	99,8	0,13	-0,16	-2	-4
2	99,6	-0,07	-0,01	0	0
1	99,7	0,01	-0,08	-2	-4
2	99,6	-0,08	0,05	0	0

Fig.IIIB.16 : Chargement de motif et repositionnement.

III.B.3.7). Influence de l'initialisation des moteurs :

Les moteurs partent en butée dans un sens puis avancent avec comptage des pas jusqu'à la butée opposée. Les valeurs des compteurs sont stockées en mémoire et mise à jour après les déplacements. C'est la valeur de ces compteurs qui est retournée lors de la demande de la position physique. Il est important pour le positionnement entre deux initialisations que ces valeurs soient reproductibles, car la position en pas moteur de l'image de référence est stockée avec le motif. La reproductibilité de détection des butées est bonne (voir le tableau ci dessous). La variation maximale est de 80 pas soit environ 10 pixels à l'écran, ce qui est négligeable par rapport au champ de vision de la caméra. En interdisant le choix du motif dans une bordure de 50 pixels autour de l'image, les coordonnées de l'image de référence en pas moteur permettent d'avoir le motif dans le champ de vision. Pour tenir compte de la fatigue des moteurs, une mise à jour dynamique de coordonnées est envisagée.

Moteur X	Moteur Y
45226	44803
45225	44882
45262	44823

Fig.IIIB.17 : Pas moteur maximum.

La première ligne du tableau, ci-dessous, est la position de référence avec ses paramètres d'initialisation. Pour les lignes suivantes, une initialisation, un calibrage, une lecture de fichier du motif et deux boucles de positionnement sont effectués. La précision du positionnement est excellente : moins d'un pixel en X et en Y, soit moins de 4 μ m.

Ecart X (pixels)	Ecart Y (pixels)	Ecart X (pas)	Ecart Y (pas)	Pas max X	Pas max Y	Pente X	Pente Y
0,01	-0,08	-2	-4	45226	44803	8,6581	-8,4631
-0,09	0,23	-4	80	45225	44803	8,6510	-8,5100
0,75	0,02	-12	10	45262	44823	8,6718	-8,5037

Fig.IIIB.18 : Positionnement après initialisation.

III.B.3.8). Causes d'échecs possibles :

Au départ, si le spot de mesure est situé sur le motif à rechercher, on ne peut pas le trouver. Dans le cas d'un premier échec au niveau de la recherche, la solution consiste à déplacer la caméra de 50 pixels dans une direction et de recommencer. La fenêtre de la chambre à plasma peut s'encrasser, d'où une modification de la qualité des images au bout de quelques dizaines d'heures de fonctionnement. La méthode de calcul peut y pallier dans une certaine limite. La valeur maximale du niveau de gris dans l'image sera un indicateur pour le nettoyage du hublot. Si l'image est bruitée, on peut appliquer un filtre passe-bas ou faire une moyenne sur plusieurs images; l'analyse de l'histogramme des images et un réglage adapté de la table de LUT doivent être mis à profit pour augmenter le contraste des images.

Chapitre IV

APPLICATIONS

La densité d'intégration et l'augmentation des rendements recherchés par les fabricants de semiconducteurs, pour le futur, impliquent des temps de gravure ou de dépôt très courts, donc des informations réduites pour la détermination et le suivi de l'épaisseur au cours du procédé. Ceci nous conduit à optimiser nos algorithmes et notre système de mesure afin d'augmenter la rapidité de réponse tout en conservant la reproductibilité de la mesure.

IV.A). Procédé "Recess" : application de la méthode Simplex :

Dans cet alinéa, nous utilisons une méthode d'optimisation intégrée dans le système final. Cette méthode du Simplex est détaillée dans l'annexe 8.

Parmi les multiples techniques et méthodes dites du Simplex, nous utilisons l'algorithme de Nelder et Mead [8], tout particulièrement lorsque le nombre d'arche du procédé ne permet pas d'utiliser les méthodes classiques.

Montage de validation et résultats :

Nous avons utilisé le montage de suivi de gravure installé chez notre partenaire.

Cet équipement est constitué par :

- 1 MS550 superviseur (A) qui gère les données et le process. On trouve associé à ce dernier un monitor couleur, un clavier et une souris.

- 1 "rack d'imagerie" (B) pour l'acquisition du signal réfléchi.

- 1 réseau local (LAN) (C) utilisé pour la communication entre le superviseur et le rack d'imagerie.

- 1 système optique (tilt) permettant de recueillir le signal interférométrique. Ce système est constitué par une lentille silice de focale 75 mm. Les fibres optiques d'émission et de réception sont placées dans le plan focal de la lentille et maintenues par un tube. Cet ensemble est monté sur support orientable optimisant la collecte du signal réfléchi.

- 1 liaison "Remote Control" permettant une parfaite synchronisation entre le superviseur et l'équipement de gravure.

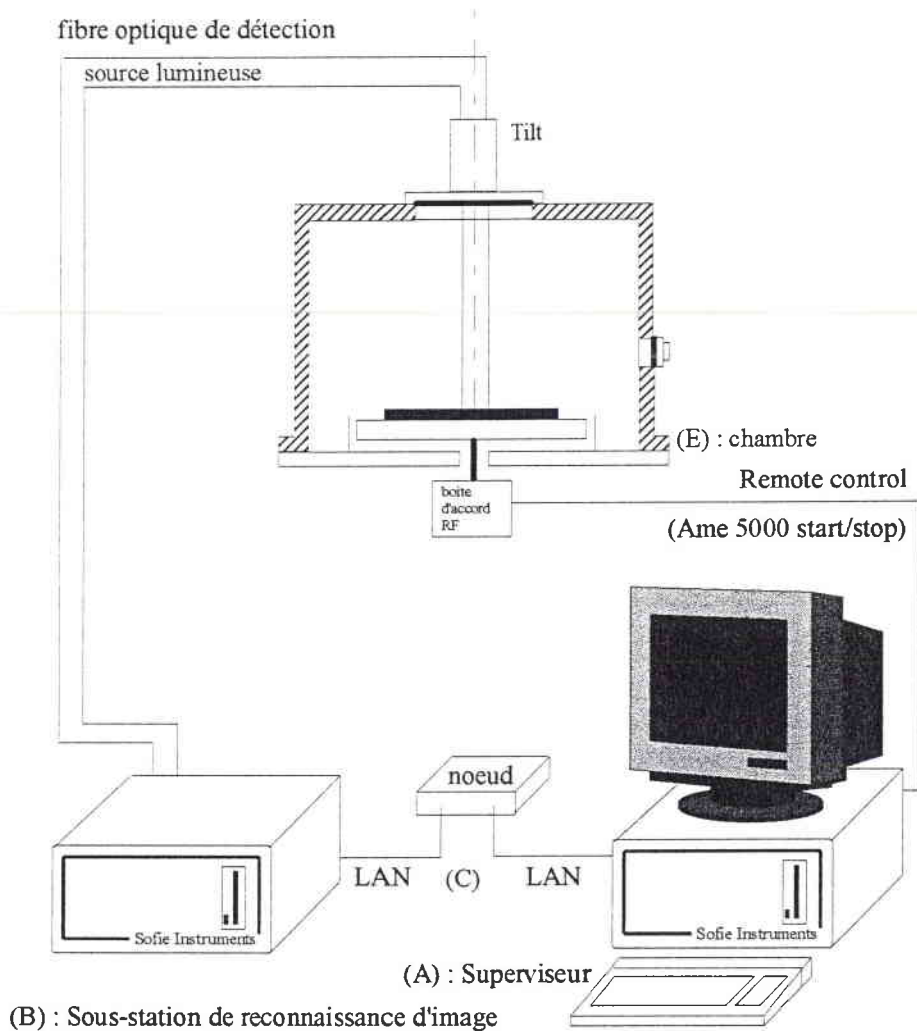


Fig.IVA.1 : Système de validation méthode Simplex.

Dans ce procédé, il s'agit de graver le polysilicium des tranches et d'arrêter la gravure lorsque l'épaisseur à graver a été atteinte, comme le montre la figure ci-dessous.

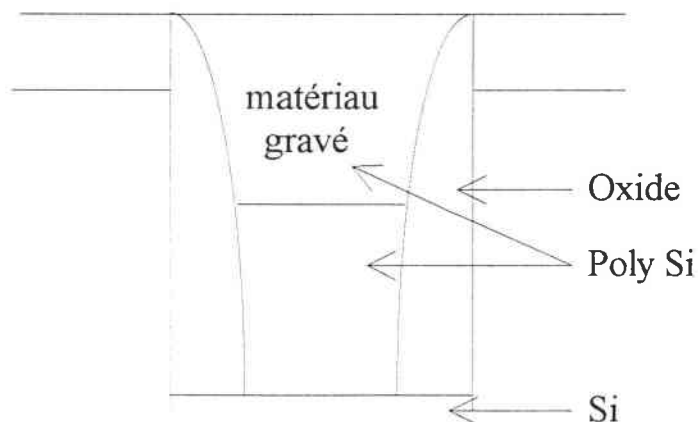


Fig.IVA.2 : Exemple de structure.

On trouvera, à la fin de ce chapitre, les graphiques obtenus.

La figure IVA.3 donne le signal interférométrique, reçu par le capteur, d'un échantillon dont l'épaisseur d'arrêt de la couche est de $E_{\text{réf.}} = 296\text{nm}$, ce qui correspond à un temps de gravure de $T_{\text{réf.}} = 25,6$ secondes, et une vitesse de gravure de $V_{\text{réf.}} = 695,1\text{nm/mn}$.

La figure IVA.4a indique les paramètres utilisés par le système pour l'acquisition de ce signal. Les paramètres remarquables sont la longueur d'onde $\lambda = 254,1$ nm, l'intervalle de temps entre deux acquisitions $\Delta t = 0,2$ s, l'indice de réfraction (celui du vide $n = 1$). Les autres paramètres des figures IVA.4a et IVA.4b permettent de fixer les conditions d'amplifications et de traitements du signal reçu.

L'algorithme de la méthode Simplex est intégré dans le système sous forme de procédure et de paramètres "d'alarmes". Ils permettent à tout instants de vérifier que le signal acquis correspond bien au signal attendu lors de la gravure. Dans le cas contraire, ces procédures peuvent arrêter le procédé avant son terme et signaler l'anomalie aux opérateurs.

Ainsi, nous définissons les paramètres suivants :

- P1: la vitesse de gravure minimale prévue dans la chambre (600 nm /mn),
- P2: la vitesse de gravure maximale prévue dans la chambre (800 nm /mn),
- P4: le nombre de point de la courbe (signal ou dérivée première) qui servira au calcul (code 1032 = '10' traitement sur le signal , '32' nombre de points pour le calcul).

Dans les conditions d'acquisitions décrites ci-dessus, la figure IVA.5 donne l'épaisseur et la vitesse de gravure par la méthode Simplex lorsque le nombre de points pour le calcul est 16, ce qui correspond à un quart de période du signal observé. La figure IVA.6 donne ce résultat pour 32 points soit une demie période. La figure IVA.7 est obtenue avec 37 points soit deux tiers de périodes. Les figures IVA.8a et IVA.8b sont réalisées avec 64 points pour le calcul simplex soit un calcul sur plus d'une période. Le tableau, ci-dessous, rassemble les résultats obtenus.

Référence courbe	P4 (points)	Vitesse V (nm/mn)	$\Delta V (\%) = \frac{ V - V_{\text{réf.}} }{V}$	temps (sec)	Δ temps (%)
IVA.5	16	-----	-----	-----	-----
IVA.6	32	703	1,12	25,8	0,77
IVA.7	37	685,5	1,38	26,4	3
IVA.8a	64	667	4,21	27	5,2
IVA.8b	64	717,1	3	26,2	2,3

Fig.IVA.9 : Performance de la méthode Simplex.

Comme on le constate, la méthode ne donne pas de résultats si la partie de la courbe analysée est inférieure à un quart de période. Si celle-ci est comprise entre une demie-période et une période, l'erreur sur le temps de gravure reste inférieure à 5,2 %.

Trois quarts de période est un bon compromis entre reproductibilité de la mesure et exigence du procédé. En effet, l'épaisseur des couches à graver tendant à diminuer (200 nm), le nombre d'arête et le temps de gravure diminuent également. Par cette méthode du Simplex, il est possible d'accéder à la vitesse de gravure et de l'épaisseur gravée en moins de 10 s. comparé aux 23 s. de la méthode utilisé jusqu'à ce jour.

IV.B). Procédé "AB" :

Pour cette application, nous utilisons le système développé dans ce projet, dont le schéma de principe est rappelé ci-dessous. Ce dernier a permis de montrer la reproductibilité du repositionnement d'une part, et de la mesure d'épaisseur d'autre part, sur des lots de production, en temps réel et in situ chez notre partenaire.

Cet équipement est constitué par :

- 1 MS550 superviseur (A) qui gère les données et le process. On trouve associé à ce dernier un moniteur couleur, un clavier et une souris.

- 1 "rack d'imagerie" (B) pour l'acquisition, le traitement d'image, la reconnaissance de motif dans cette image, le repositionnement du spot d'analyse sur ce motif et l'acquisition du signal réfléchi.

- 1 Réseau local (LAN) (C) utilisé pour la communication entre le superviseur et le rack d'imagerie.

- 1 Caméra CCD (D) possédant deux fonctions principales :
 - la visualisation de la tranche.
 - capteur du faisceau réfléchi.

La longueur d'onde utilisée est 655 nm.

- 1 liaison "Remote Control" permettant une parfaite synchronisation entre le superviseur et l'équipement de gravure.

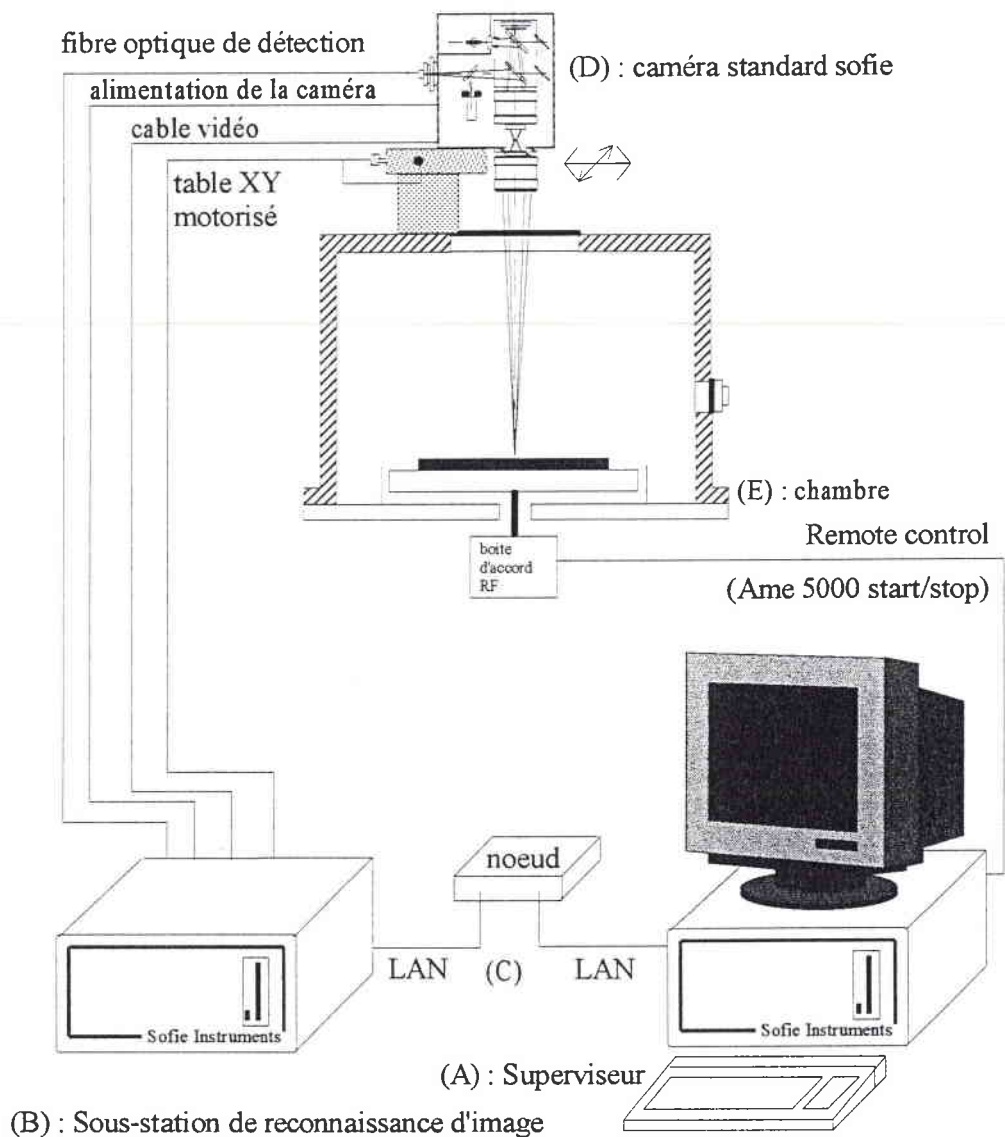


Fig.IVB.1 : Système de reconnaissance d'image et de repositionnement.

Principe :

L'expérience est installée sur un équipement de gravure AMAT P5000. Le procédé suivi est constitué de deux étapes principales :

1. Gravure de la résine : une couche de photo-résine déposée sur une couche de TEOS est enlevée.

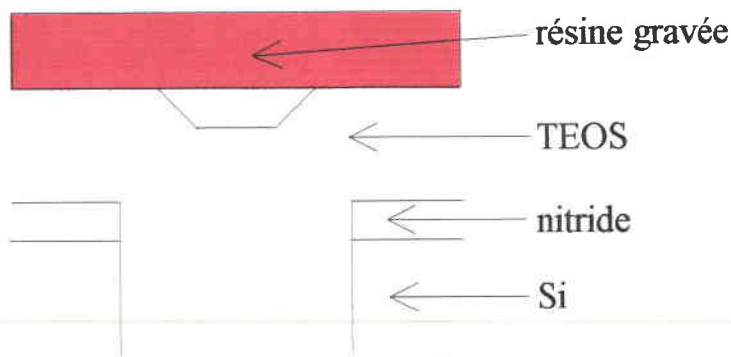


Fig.IVB.2 : Structure des tranches avant l'étape "RESIST ETCH".

2. Gravure du TEOS : la couche de TEOS est enlevée jusqu'à une profondeur désirée.

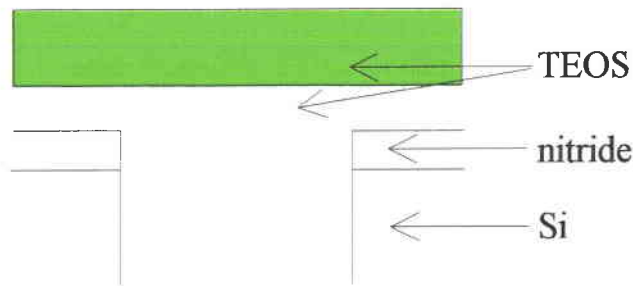


Fig.IVB.3 : structure des tranches lors de l'étape "TEOS ETCH".

Les équipements de gravure sont, en général, programmés avec des séquences de stabilisation des procédés (10 s.). Ce temps nous permet la recherche du motif et le calcul de l'épaisseur de la couche avant le début du procédé lui-même.

Le robot place une tranche de production dans la chambre de process, et commence, donc, une étape de stabilisation. Durant cette étape le superviseur débute une séquence de reconnaissance de motif et ordonne au rack d'imagerie de positionner le spot laser sur le motif préalablement sauvegardé.

Le rack d'imagerie digitalise et analyse l'image de la tranche, détermine le décalage entre la position courante du spot et la position recherchée. Après calcul, le rack d'imagerie commande les moteurs pas à pas de la table XY, et amène la caméra (ie le spot laser) sur la correcte position.

A la fin de cette opération, le contrôle retourne au superviseur qui attend l'étape suivante de gravure. Les paramètres associés à cette étape traditionnelle sont téléchargés à la sous-station (ie rack d'imagerie) à travers le réseau LAN.

Tout comme pour l'étape de reconnaissance, l'acquisition débute sur l'information RFON issue de l'équipement de gravure. Le superviseur affiche alors la courbe interférométrique et la sous-station arrête la gravure, à travers la liaison "remote control" lorsque la profondeur est atteinte.

L'équipement de gravure retire et recharge une nouvelle tranche de production.

Les résultats :

La figure IVB.4 donne un exemple de motif à reconnaître.

La figure IVB.5a donne le paramétrage utilisé dans l'étape de gravure de la résine et le tableau en Fig.IVB.5.b le paramétrage de l'étape "Teos".

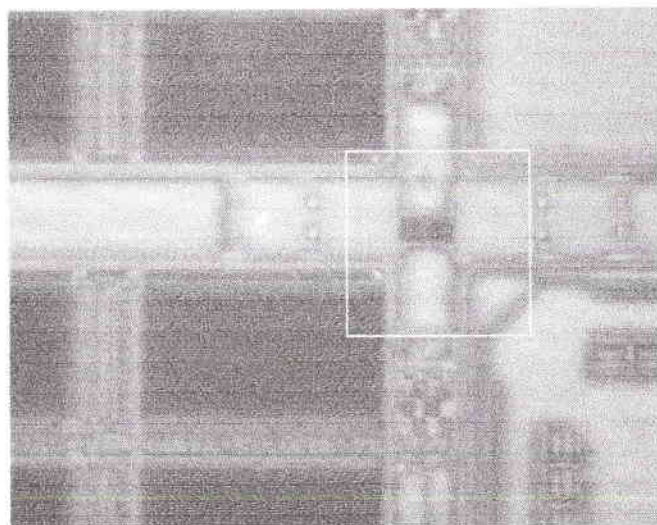


Fig.IVB.4 : Exemple de motif à reconnaître.

Fig.IVB.5a : Paramétrage utilisé pour l'étape "Résine".

Canal interférométrique	voie 1
longueur d'onde	655 nm.
échantillonnage	0,4 seconde
indice de réfraction	1,5
calcul de la vitesse à partir de	40 secondes
amplification "coarse gain"	2
amplification "fine gain"	1
gain sur la dérivée première	4
offset	0 %
temps "Learn time"	2 secondes
mise à l'échelle du signal	20 %
filtrage du signal	9
paramétrage d'arrêt	non

Fig.IVB.5b : Paramétrage de l'étape "Teos".

Canal interférométrique	voie 1
longueur d'onde	655 nm.
échantillonnage	0,4 seconde
indice de réfraction	1,5
calcul de la vitesse à partir de	15 secondes
amplification "coarse gain"	2
amplification "fine gain"	1
gain sur la dérivée première	2
offset	0 %
temps "Learn time"	12 secondes
mise à l'échelle du signal	20 %
filtrage du signal	107
paramétrage d'arrêt	non

Nous obtenons les résultats du tableau ci-dessous :

Numéro Run	Oxide (Angström)	Nitride (Angström)	Oxide (Corrigé)
6	1233	1260	1122
14	1315	1160	1113
7	1090	1370	1080
8	1120	1390	1128
9	1085	1380	1084
10	1080	1410	1106
11	1125	1410	1151
12	1065	1410	1091
13	1075	1410	1101
15	1095	1390	1103
16	1110	1390	1118
17	1080	1410	1106
18	1060	1430	1104
19	1105	1370	1095
20	1110	1420	1145
21	1035	1430	1079
22	1115	1420	1150
23	1170	1390	1178
24	1100	1370	1090
25	1075	1410	1101
moyenne	1094,2	1400,6	1111,5
cible (A)			1120,0
origine	2393,5		
pente	-0,910		
déviati on std	63,6		26,6

Fig.IVB.6 : Epaisseurs mesurées et comparaisons.

Fig.IVB.7

Corrélation entre les épaisseurs d'oxide et de nitrure

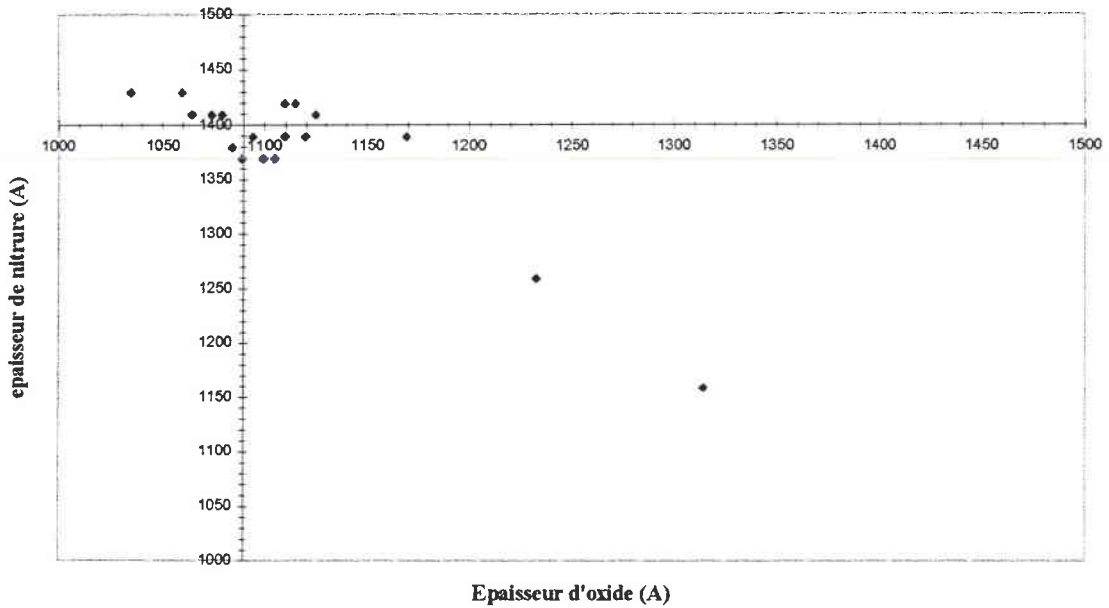
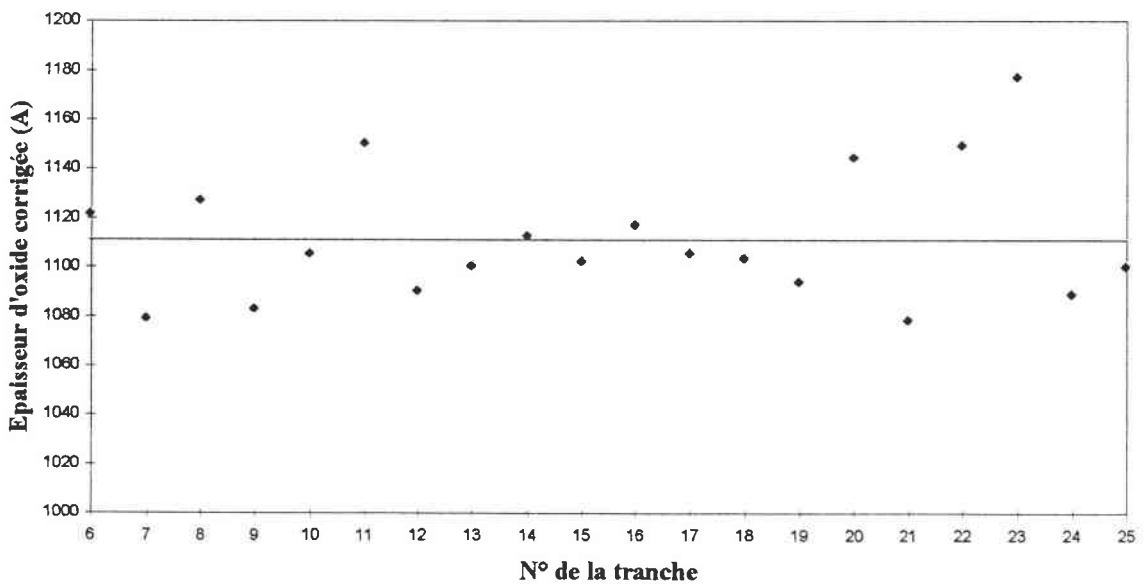


Fig.IVB.8

Epaisseur d'oxide corrigée de la variation d'épaisseur de la sous couche de nitrure



Avec le Prometrix nous connaissons l'épaisseur d'oxide et de nitrure pour chaque tranche. Comme nous le constatons en colonne B, l'épaisseur de nitrure n'est pas constante et cette variation a un effet sur la détermination de l'épaisseur de l'oxide. Dans ces conditions, l'écart type de la mesure est de 63,6 Angströms.

Maintenant, si nous prenons en compte la variation de nitrure nous obtenons une déviation standard de la mesure de 26,6 Å seulement.

Sachant que la vitesse de gravure est de 321nm/mn soit 5,35 nm/s et que l'échantillonnage entre deux acquisitions est de 0,4s, soit 2,14 nm, l'erreur commise entre l'épaisseur cible et l'épaisseur de l'échantillon est due au temps d'échantillonnage.

Les résultats obtenus en terme de précision du repositionnement (inférieure à 1 pixel), de reproductibilité et de rapidité (inférieure à la seconde pour la reconnaissance d'image) sont satisfaisants et parfaitement compatibles avec une intégration dans les équipements multi-chambres structurés autour d'un robot central (cluster-tools).

Les premiers résultats sur la détermination de l'épaisseur montrent une parfaite corrélation (précision et reproductibilité) avec les épaisseurs qui doivent et devront être atteintes dans le futur, et qui peuvent être améliorés en optimisant le paramétrage d'acquisition des données.

Validation en production :

Pour valider le système complètement en production, il faut pouvoir, dans l'étape 1 "RESIST ETCH", suivre en émission optique la raie CN (230,6 nm) afin de déterminer la totale élimination de la résine avant de poursuivre les étapes de ce procédé.

En effet, la résine absorbe les longueurs d'onde courte. Aussi, lorsque la résine disparaît, l'intensité du signal recueillie par le photomultiplicateur augmente. Le suivi de cette variation permet de détecter la présence, l'absence ou la double épaisseur de résine avant de commencer l'étape du "TEOS ETCH".

Le système est donc complété par un monochromateur SCM200 de 200 mm de focale, qui connecté au système d'imagerie précédent (fig.IVB.1) assurera cette fonction comme le montre la figure IVB.10.

Procédure de validation pré-production :

Ci-dessous, nous donnons le paramétrage du système pour l'utilisation du monochromateur :

Canal émission optique	voie 2
longueur d'onde	230,6 nm.
échantillonnage	0,8 seconde
indice de réfraction	1,5
calcul de la vitesse à partir de	30 secondes
amplification "coarse gain"	6
amplification "fine gain"	2
gain sur la dérivée première	3

offset	10 %
temps "Learn time"	5 secondes
mise à l'échelle du signal	50 %
filtrage du signal	9

Fig.IVB.9 : Paramétrage du canal Emission Optique.

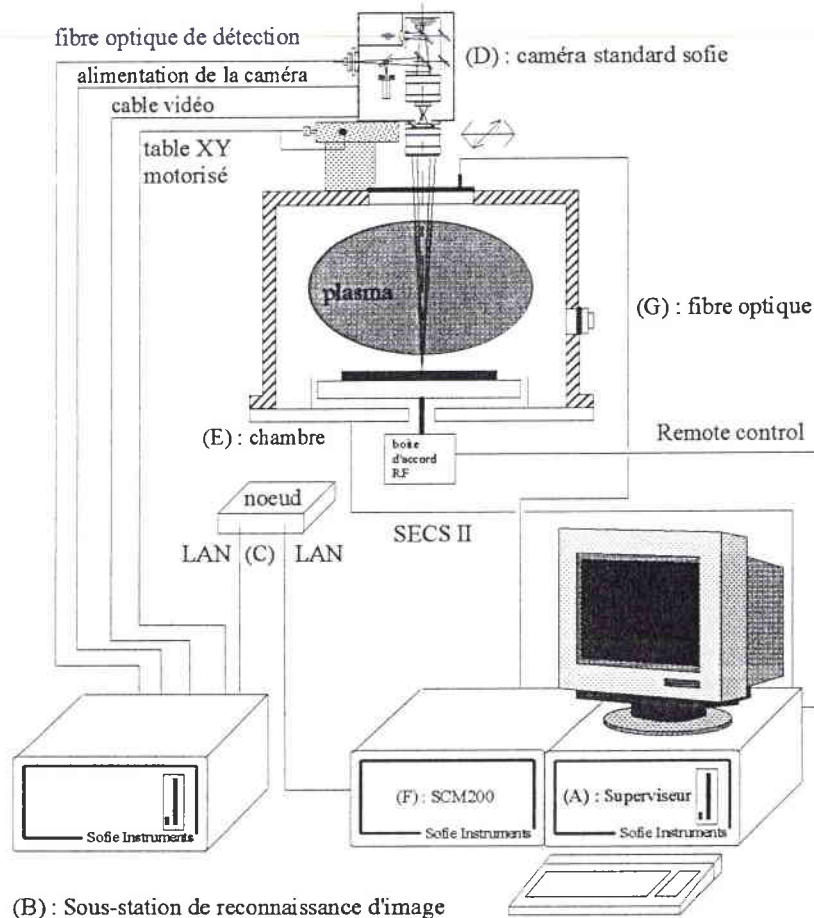


Fig.IVB.10 : Prototypé de validation en production.

Une première gravure de résine ("RESIST ETCH") est faite. Les arches issues de l'interférométrie ($\lambda = 655\text{nm}$) sont de grandes amplitudes tandis que le suivi de l'émission optique du plasma à la longueur d'onde de 230.6nm est très faible, comme le montre la figure IVB.11. Ceci nous impose d'avoir une amplification maximale de la chaîne d'acquisition, ce qui n'est pas acceptable pour une production large série. Pour l'étape "TEOS ETCH", une tranche est gravée à un temps fixe, une autre est mesurée par le Nanospec avant et après gravure. Là encore, l'amplification sur la voie 2 est maximale et le signal très perturbé, comme l'indique la figure IVB.12.

Pour palier ce défaut d'intensité, nous optimisons, dans un premier temps, les paramètres d'acquisitions et nous disposons une lentille collectrice devant la fibre optique d'analyse du plasma, comme le montre le montage suivant.

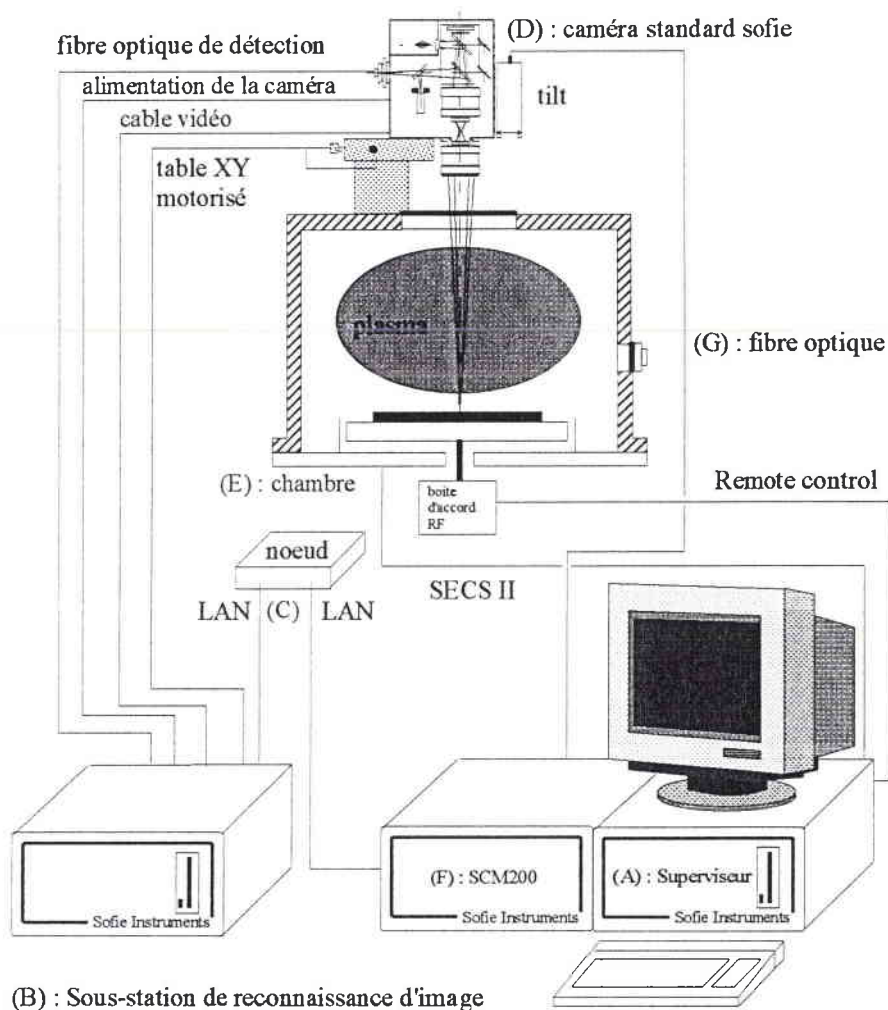


Fig.IVB.13 : Prototype de validation en production avec lentille collectrice.

IV.C). Procédé "Recess" : validation.

Le montage ainsi défini (fig. IVB.13) est utilisé pour contrôler l'épaisseur gravée de polysilicium dans l'étape "Recess 2".

- Il est composé :
- d'un spectrographe de 200mm de focale à barrette de photodiodes intensifiées,
 - d'un monochromateur avec tube photomultiplicateur,
 - d'une caméra petit spot permettant la visualisation de la tranche pour la reconnaissance d'image ainsi que la collecte du faisceau réfléchi pour le calcul de l'épaisseur,
 - d'une table motorisée XY,
 - d'une source blanche : Xénon.

Dans cette étape, il s'agit de graver le polysilicium à une valeur déterminée. Pour cela il nous faut mesurer l'épaisseur de nitrure constituant la première couche de

l'empilement et l'ajouter à l'épaisseur de polysilicium à graver pour obtenir l'épaisseur totale devant être entrée dans le logiciel.

Nous définissons deux zones dans les tranches :

- "l'array" : partie active de la mémoire, constituée de "trous" profonds dans le polysilicium. La structure est donnée par la figure ci-dessous :

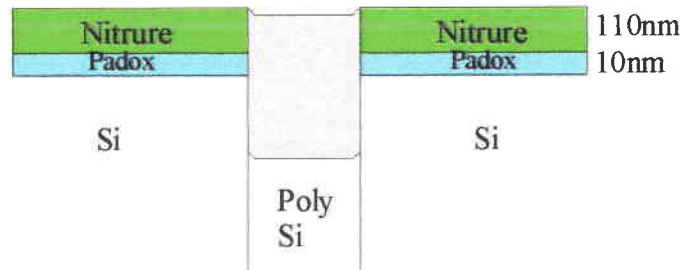


Fig.IVC.1 : Structure "Array"

-le "Kerf" : partie possédant la même structure mais sans "trous" profonds.

La figure ci-dessous donne l'image d'une tranche pour la fabrication des mémoires 64 et 256 Mb.

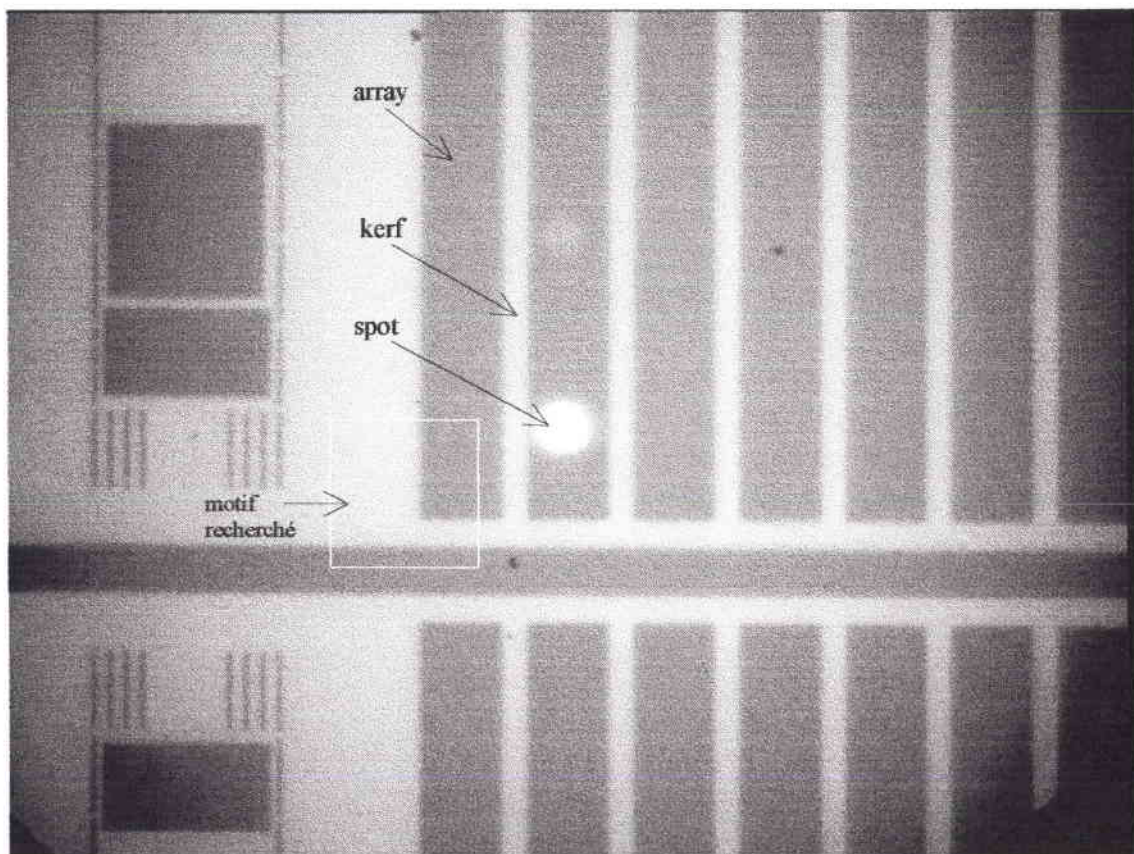


Fig.IVC.2 : Exemple d'image : Mémoire 64 Mb / 256 Mb

L'analyse de l'information est faite dans la gamme 400 - 700 nm. L'acquisition des spectres de réflectance par la barrette de photodiodes est réalisée toutes les 200 ms. Le calcul de l'épaisseur est obtenue en 300ms (Pentium 75 Mhz) avant que la gravure débute. Le repositionnement du spot d'analyse est effectué pour chaque tranche de production en moins de 5 secondes. Divers types de mesures sont effectués.

Dans un premier temps nous effectuons des mesures d'épaisseurs dans le kerf et dans l'array par le système aussi défini. Nous comparons les résultats spectroscopiques avec les mesures obtenues par la méthode ellipsométrique. La figure IVC.3 présente les résultats obtenus.

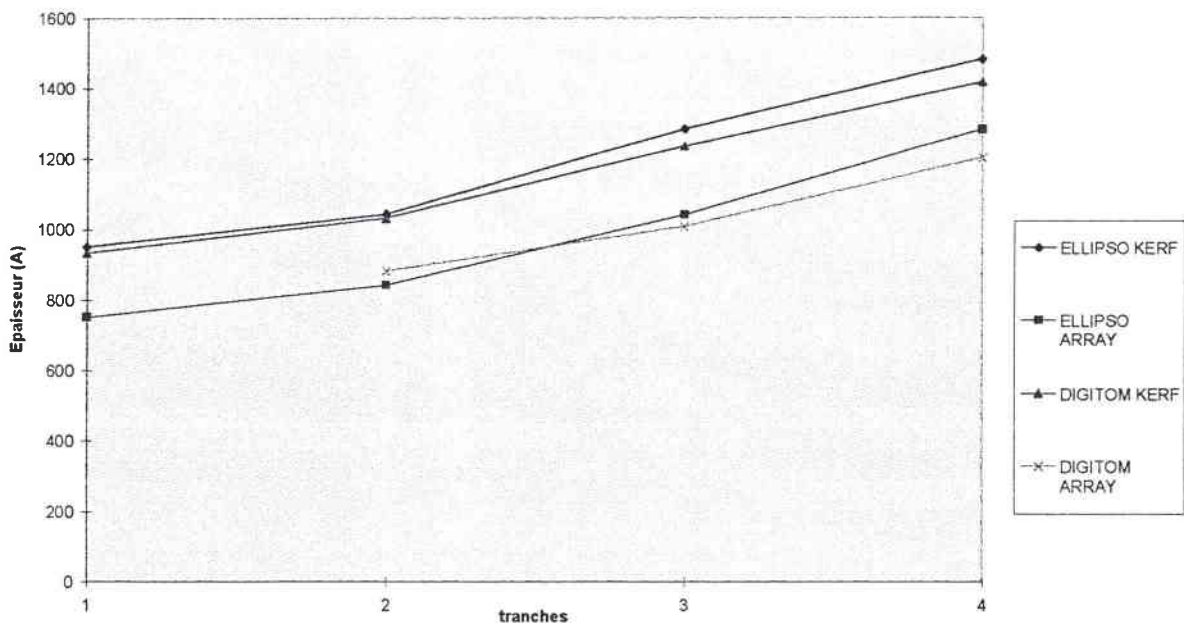


Fig.IVC.3 : Comparaisons mesures spectroscopiques et ellipsométriques.

Nous obtenons moins de 5% d'écarts entre les deux méthodes.

La figure suivante montre la répétabilité de la mesure calculée par le système pour une même position dans le kerf.

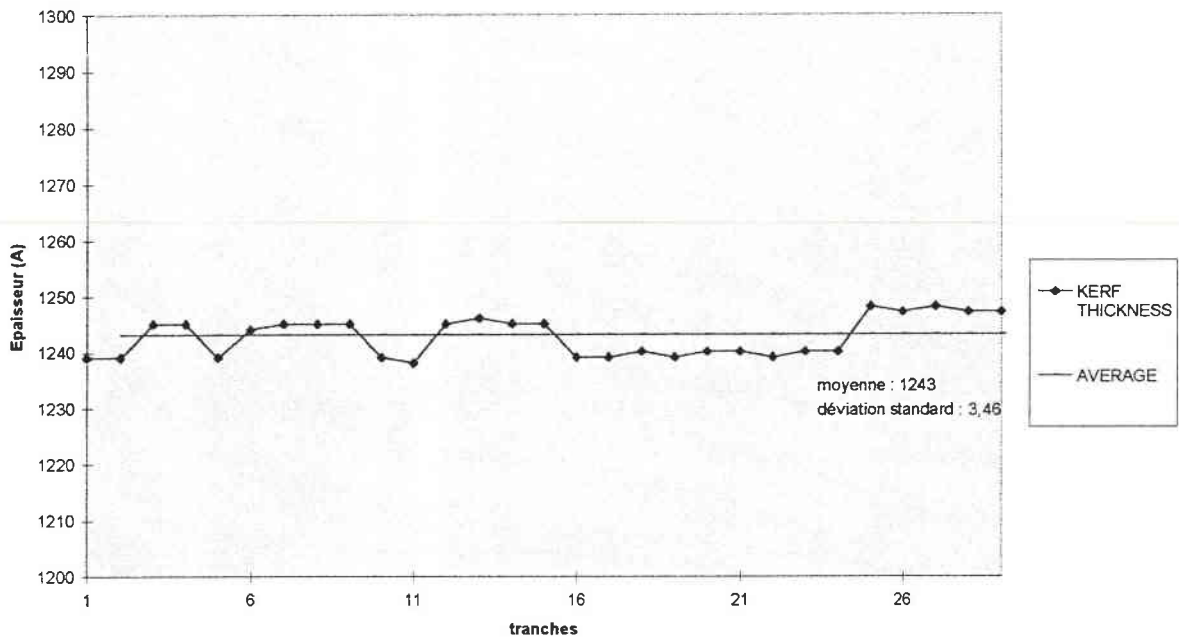


Fig.IVC.4 : Répétabilité de la mesure (statique)

La répétabilité de la mesure avec reconnaissance d'image et repositionnement du spot d'analyse sur le site est alors étudiée. Pour cela, nous effectuons l'enchaînement des étapes suivantes :

- déplacement de la table XY,
- reconnaissance d'image et positionnement du spot,
- détermination de l'épaisseur.

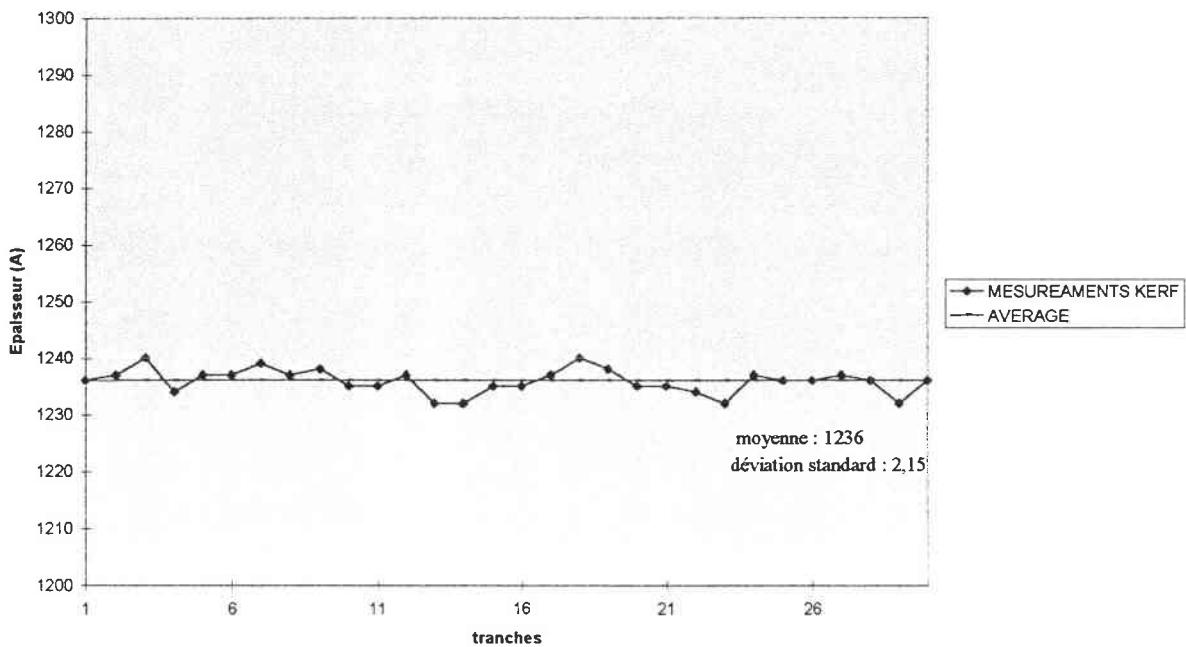


Fig.IVC.5 : Répétabilité de la mesure (dynamique)

Dans ces deux cas, nous avons moins de 0,3 % de variations par rapport à la valeur moyenne de l'épaisseur calculée. La reproductibilité de la mesure est validée.

Un lot de production est alors gravé en automatique. Les étapes du procédé sont :

- positionnement par reconnaissance d'image du spot d'analyse sur le kerf,
- mesure de l'épaisseur du kerf,
- positionnement par reconnaissance d'image du spot d'analyse dans l'array,
- mesure de l'épaisseur de l'array,
- l'épaisseur de nitrure est transférée à l'étape principale de gravure,
- gravure et arrêt de la gravure en utilisant la méthode classique : interférométrie à incidence normale avec $\lambda=253,7\text{nm}$. L'épaisseur de nitrure est fixée à 113 nm.

Différentes épaisseurs d'arrêt sont données. La figure IVC.6, ci-dessous, montre les résultats obtenus.

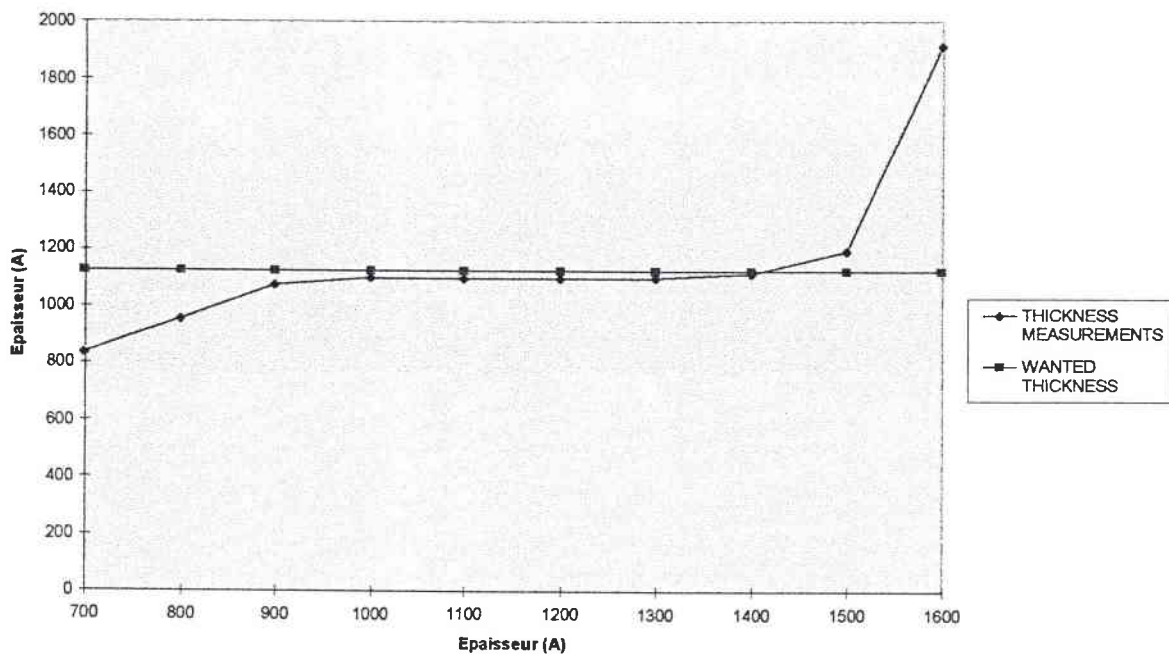


Fig.IVC.6 : Epaisseur mesurée en fonction de l'épaisseur demandée.

Les figures IVC.7a et IVC.7b montrent deux exemples de spectre cannelé obtenus ainsi que le modèle mathématique ayant été utilisé pour la détermination de l'épaisseur.

Une dernière étude est menée afin de connaître l'influence de la position du spot d'analyse sur le calcul d'épaisseur. La figure IVC.8 en résume les résultats.

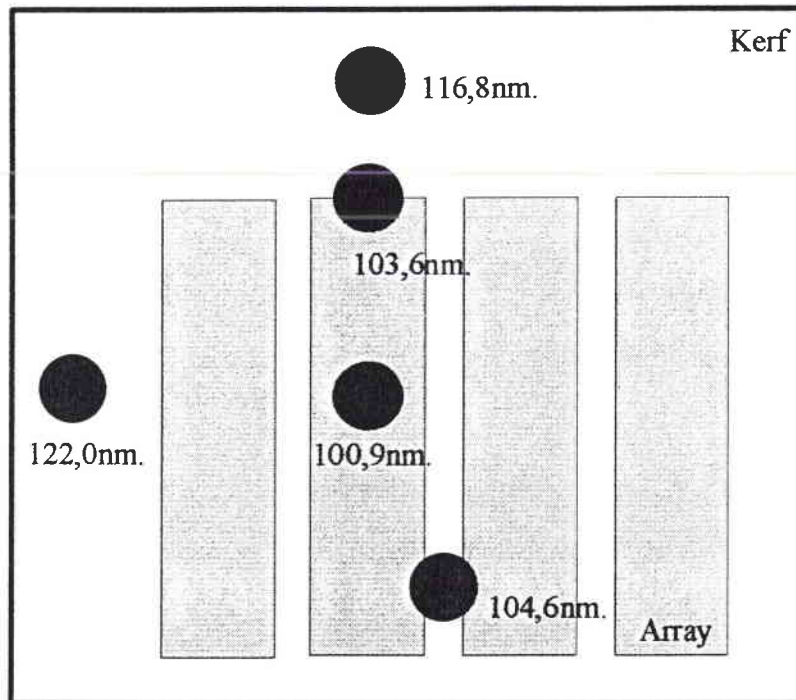
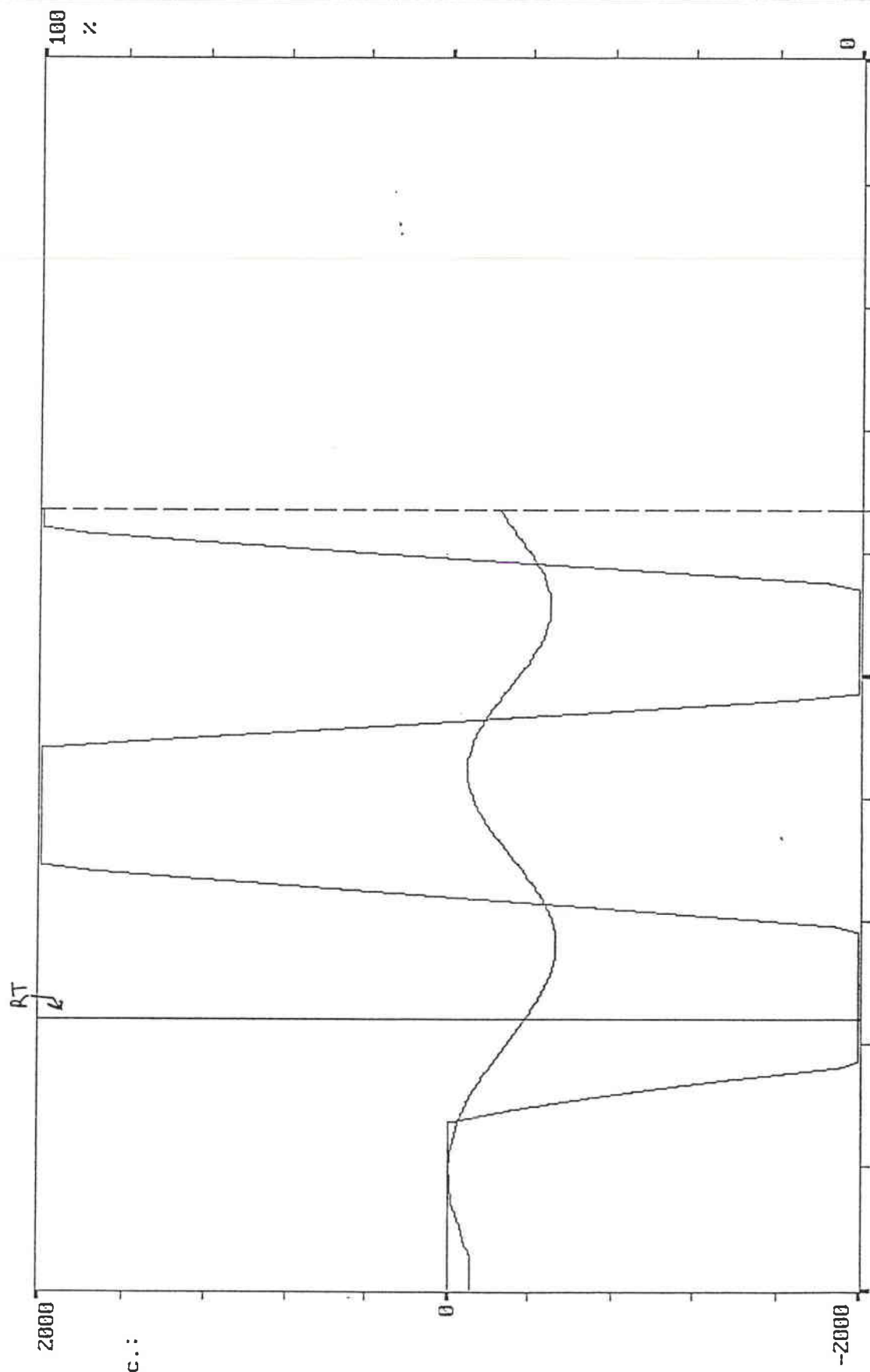


Fig.IVC.8 : Influence de la position du spot d'analyse sur la mesure.

Comme on le constate, une erreur sur la position du spot d'analyse peut engendrer une incertitude sur la mesure d'épaisseur pouvant aller jusqu'à 18%. On comprend dans ces conditions que le positionnement du spot d'analyse est indispensable et incontournable.

Repro: 120 Time: 25.6 s EPD Alarm: -----

Pg Dn



Batch, Step, Rec.:
RECESS 2 ETCH
REC 2

Ch. 1
CG: 4
FG: 2
635 U

*1-Int. Sig: 43.9% Der1: 2000 Der2: 0 Th: 296.5 nm Rt: 695.1 nm/mn

Cursor: 25.6 s

1:	s	4:	s
2:	s	5:	s
3:	s	6:	s

CH.1 INTERF. ACQUISITION PARAMETERS

Pg Up Pg Dn

Enter
+
-
Ctr +
Ctr -

WAVELENGTH:	254.10	nm	COARSE GAIN:	4	
SAMPLING :	0.2	sec	FINE GAIN:	2	
INDEX :	1.000		DERIV. GAIN:	3	
RATE TIME :	9	sec	SHIFT :	0	%
DEFAULT HV:	660	V	LEARN TIME :	1	sec
SLIT WIDTH:	500	µm	SCALE FACT.:	50	%
			FILTERING :	7	
			MAGN. FIELD:	-	

Fig.IVA.4a : Paramétrages Recess 2.

CH.1 INTERF. ENDPOINT PARAMETERS

Pg Up Pg Dn

Enter
+
-
Ctr +
Ctr -

```

CLOSE TIME : 20 sec 1ST DERIVATIVE : 0
OPEN TIME : 26 sec 1ST DERIV. SENS : >
SIGNAL : 0 % 1ST DERIV. TESTS: 1
SIGNAL SENS : > 2ND DERIVATIVE : 0
SIGNAL TESTS: 1 2ND DERIV. SENS : >
                2ND DERIV. TESTS: 1
OVERETCH TYPE : Sec
OVERETCH VALUE: 0
STOP THICKNESS : 296 nm

```

Fig.IVA.4b : Paramétrages Recess 2.

CH.1 INTERF. ALARM PARAMETERS

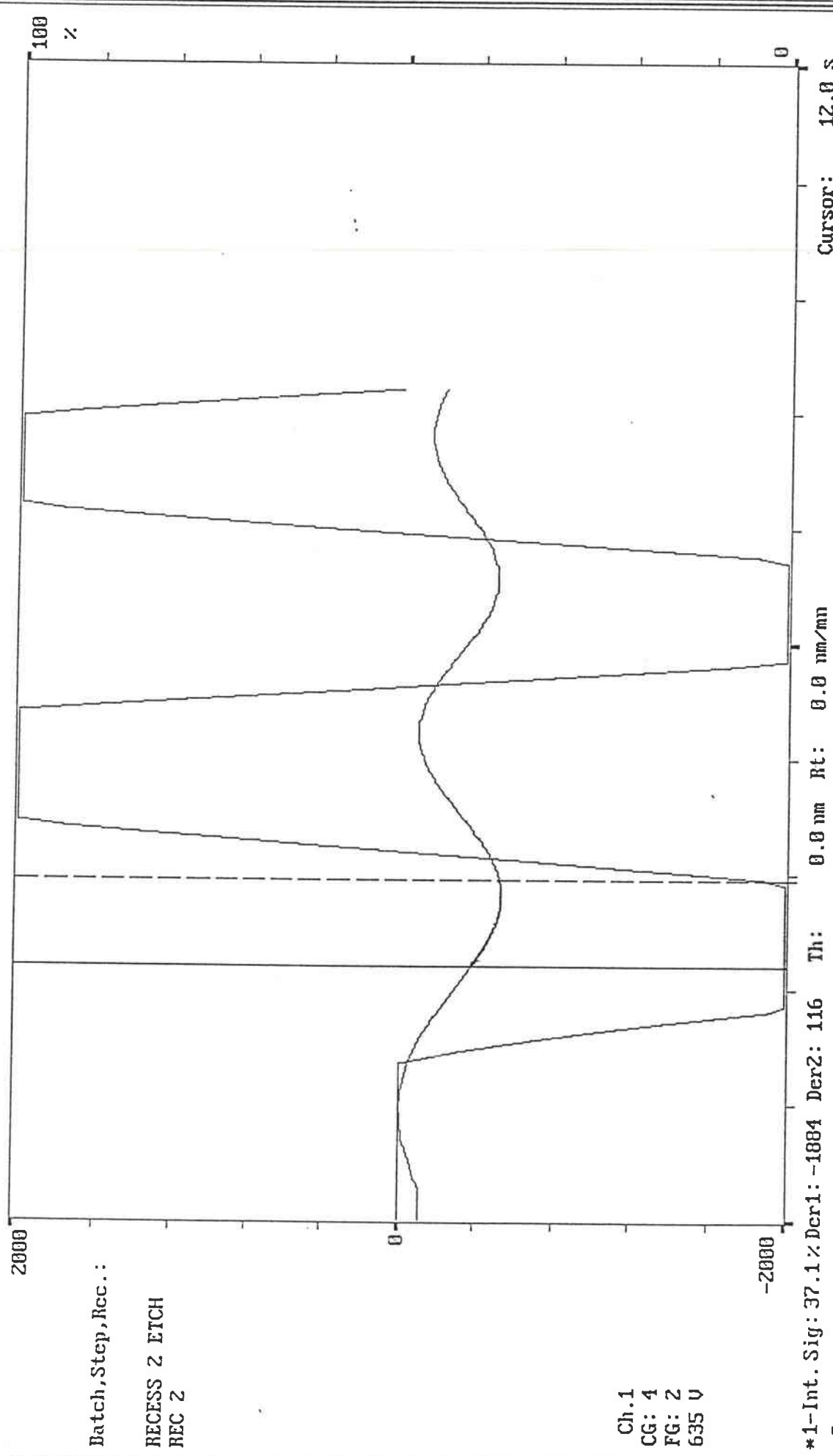
Pg Up Pg Dn

Enter
+
-
Ctr +
Ctr -

A	B	C	D
*****	*****	*****	*****
TYPE: 139	TYPE: 0	TYPE: 0	TYPE: 0
P1 : 600	P1 : 0	P1 : 0	P1 : 0
P2 : 800	P2 : 0	P2 : 0	P2 : 0
P3 : 0	P3 : 0	P3 : 0	P3 : 0
P4 : 1032	P4 : 0	P4 : 0	P4 : 0
P5 : 1	P5 : 0	P5 : 0	P5 : 0
ACT.: 0	ACT.: 0	ACT.: 0	ACT.: 0

Fig.IVA.4c : Paramétrages Recess 2.

SaveSt **Repro:120 Time: 12.0 s CLOSE Alarm: -----** Pg Dn



Batch, Step, Rec.:
RECESS 2 ETCH
REC 2

Ch.1
CG: 4
FG: 2
635 U

*1-Int. Sig: 37.1 % Der1: -1884 Der2: 116 Th: 0.0 nm Rt: 0.0 nm/mm

Cursor: 12.0 s

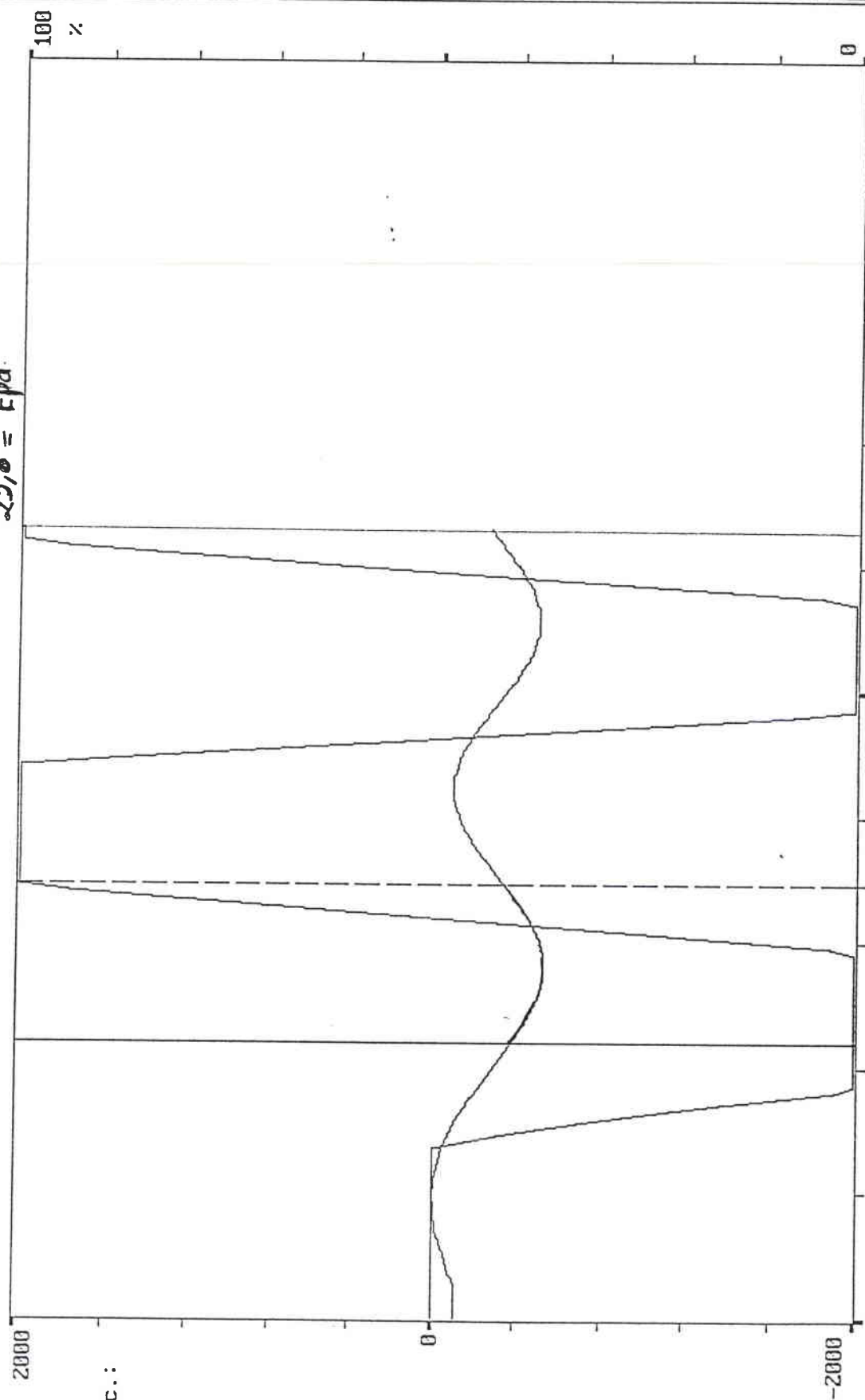
1:	S	4:	S
2:	S	5:	S
3:	S	6:	S

F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Entcr CtrEnt F5 CtrF5 ShIF5 F6 CtrF6 ShIF6

Fig IVA 5 : Simplex sur 1/4 de période

Repro: 120 Time: 14.0 s CLOSE Alarm: -----
 25,8 = Epd.

Pg Dn



Batch, Step, Rec.:

RECESS 2 ETCH
REC 2

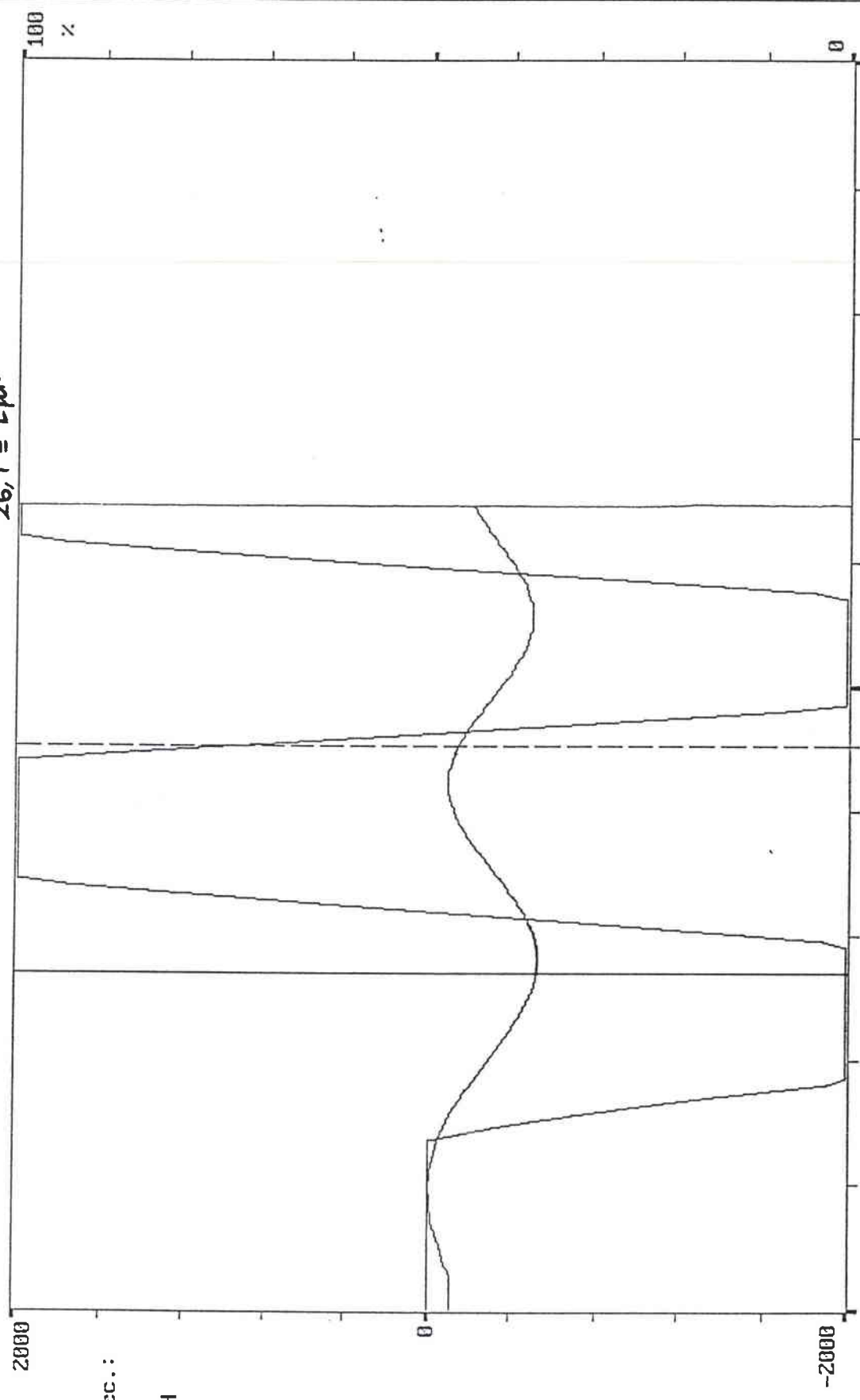
Ch: 1
CG: 4
FG: 2
635 U

*1-Int. Sig: 41.4% Der1: 2000 Der2: 236 Th: 164.0 nm Rt: 703.0 nm/mn

Cursor: 14.0 s
 1: s 4: s
 2: s 5: s
 3: s 6: s

Fig.IVA.6 : Simplex sur 1/2 de période

ShaveSt **Repro: 120 Time: 18.4 s CLOSE Alarm: -----**
 26,4 = E_{pd}



Batch, Step, Rec.:
 RECESS 2 ETCH
 REC 2

Ch. 1
 CG: 4
 FG: 2
 635 U

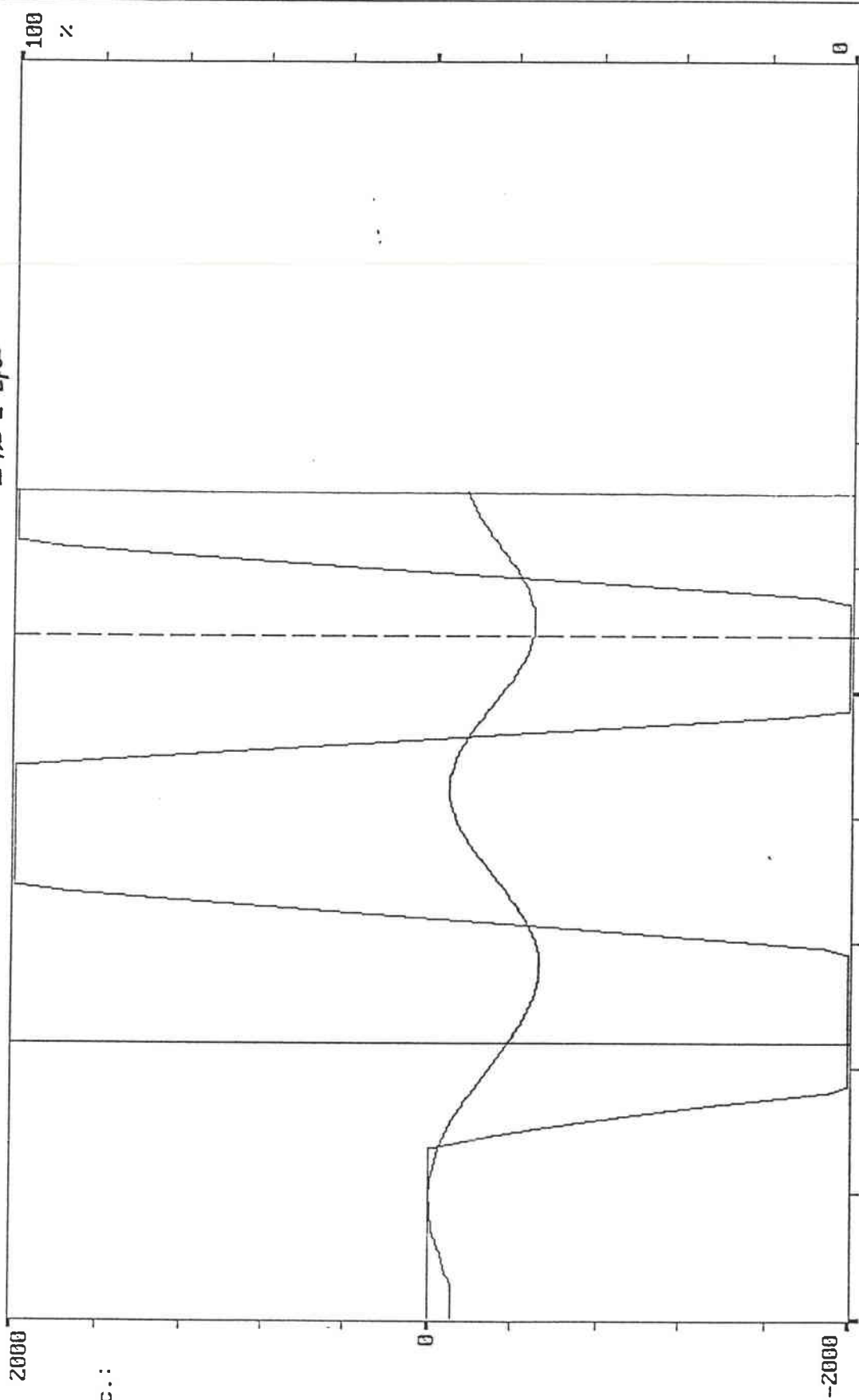
*1-Int. Sig: 46.3% Der1: 636 Der2: -492 Th: 210.5 nm Rt: 686.5 nm/mn

Cursor: 18.4 s
 1: s 4: s
 2: s 5: s
 3: s 6: s

F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Enter CtrEnt F5 CtrF5 ShIF5 F6 CtrF6 ShIF6

Fig. IVA.7 : Simplex sur 2/3 de période.

Repro: 120 Time: 22.0 s OPEN Alarm: -----
24s = EPd



Batch, Step, Rec.:
RECESS 2 ETCH
REC 2

Ch. 1
CG: 4
FG: 2
635 V

*1-Int. Sig: 37.7 % Der1: -2000 Dcr2: 0 Th: 244.8 nm Rt: 667.7 nm/mn

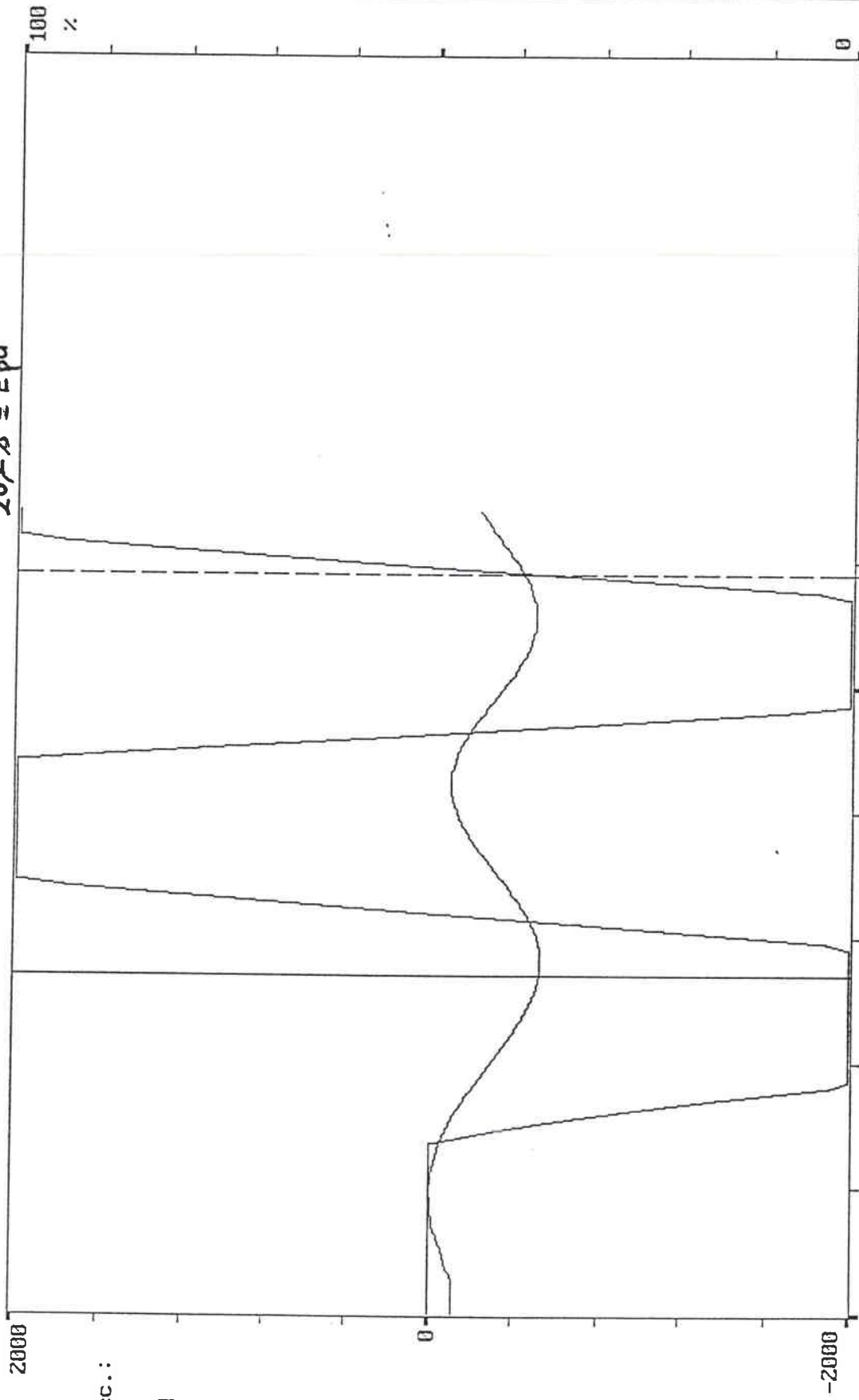
Cursor:	22.0 s
1:	s 4: s
2:	s 5: s
3:	s 6: s

F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Enter CtrEnt F5 CtrF5 SHIF5 F6 CtrF6 SHIF6

Fig IVA 8a : Simplex sur plus d'une période

Repro: 120 Time: 23.8 s OPEN Alarm: -----
Pg Dn

262 s = Epd



Batch, Step, Rec.:

RECESS 2 ETCH
REC 2

Ch. 1
CG: 4
FG: 2
635 U

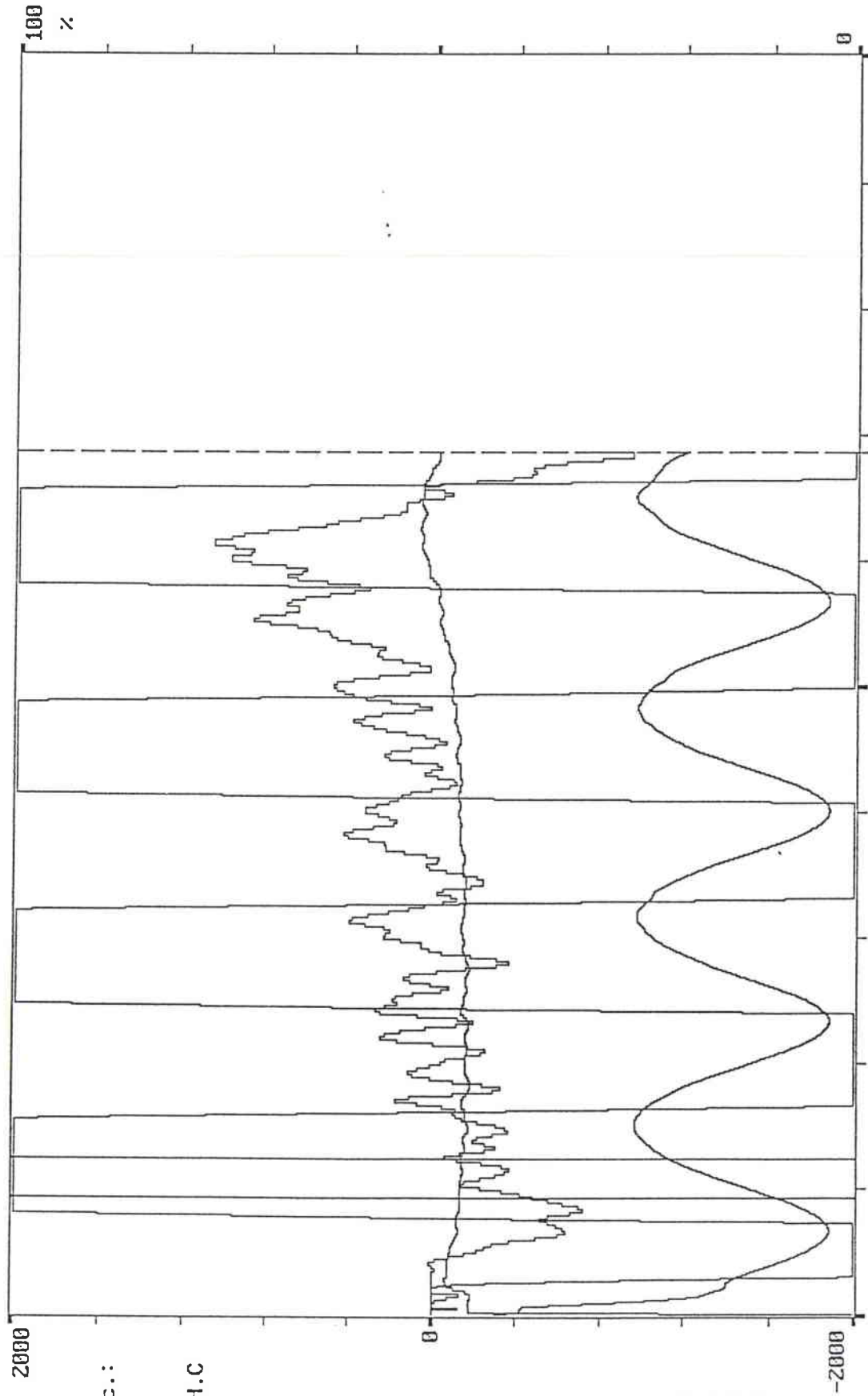
*1-Int. Sig: 39.2% Der1: -468 Der2: 468 Th: 204.4 nm Rt: 717.1 nm/mn

Cursor: 23.8 s
1: s 4: s
2: s 5: s
3: s 6: s

F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Enter CtrEnt F5 CtrF5 ShiF5 F6 CtrF6 ShiF6

Fig IVA 8h · Simplex sur plus d'une période

Repro: 153 Time: 220.0 s OPEN Alarm: ----- Pg Dn



Batch, Step, Rec.:

RESINE ETCH
AB-ETCH LC CH.C

Ch.1 Ch.2
CG: 2 CG: 6
FG: 1 FG: 2
525 U 694 U

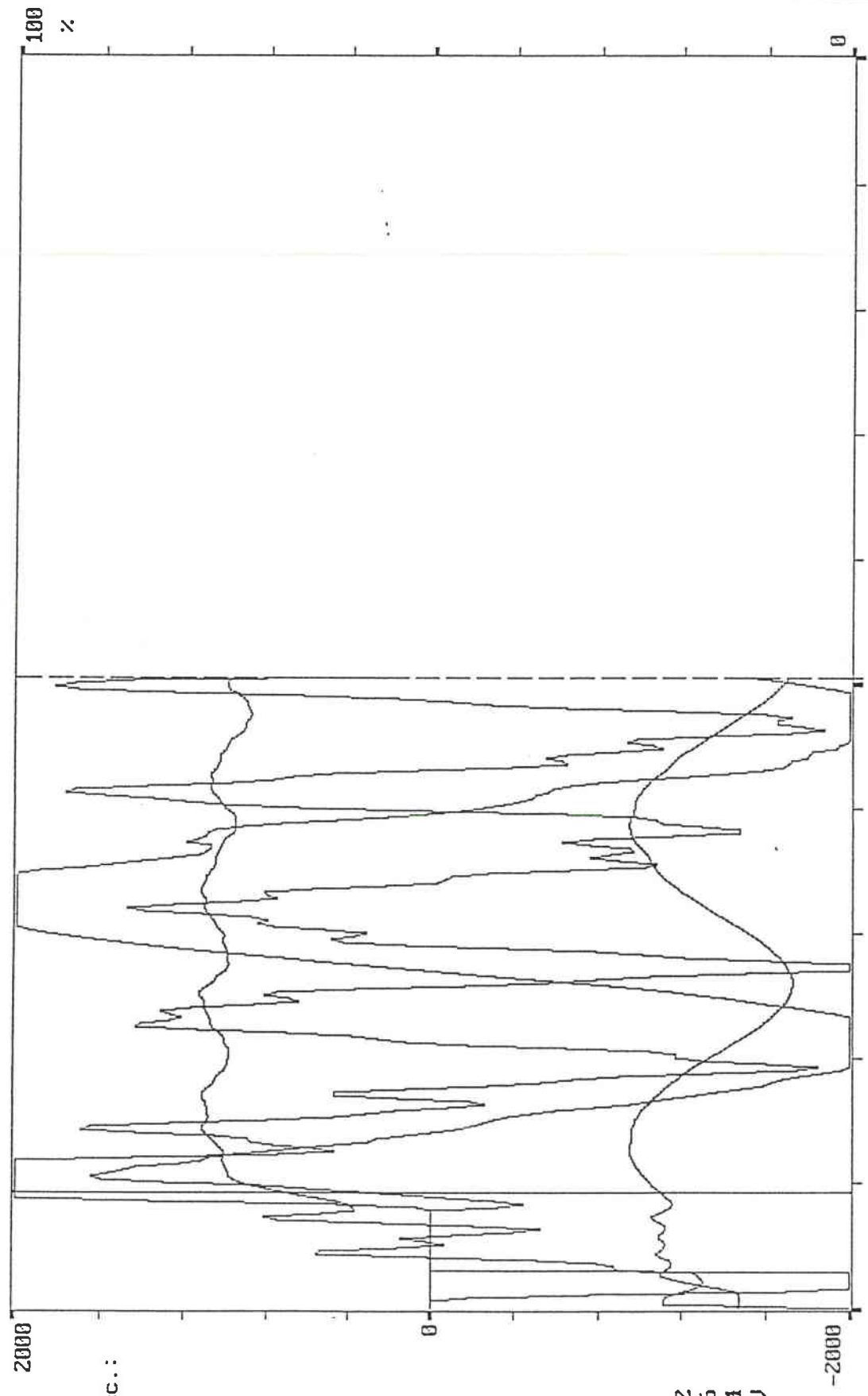
*1-Int. Sig: 19.8% Der1: -2000 Der2: 0 Th: 900.5 nm Rt: 245.6 nm/mn
2-Int. Sig: 50.0% Der1: -780 Der2: 156 Th: 0.0 nm Rt: 0.0 nm/mn

Cursor: 220.0 s
1: s 4: s
2: s 5: s
3: s 6: s

F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Enter CtrEnt F5 CtrF5 Shift F6 CtrF6 Shift F6

Fig.IVB.11 : Exemple courbe Resine Etch

Repro: 154 Time: 81.2 s OPEN Alarm: -----



Batch, Step, Rec.:

TEOS-ETCH
AB-REWORK

Ch. 1 Ch. 2
CG: 2 CG: 6
FG: 1 FG: 4
532 U 699 U

*1-Int. Sig: 7.5 % Der1: -1488 Der2: 132 Th: 443.3 nm Rt: 327.6 nm/mn
2-Opt. Sig: 72.9 % Der1: 160 Der2: -1280

1:	s	81.2	s
2:	s	4:	s
3:	s	5:	s
	s	6:	s

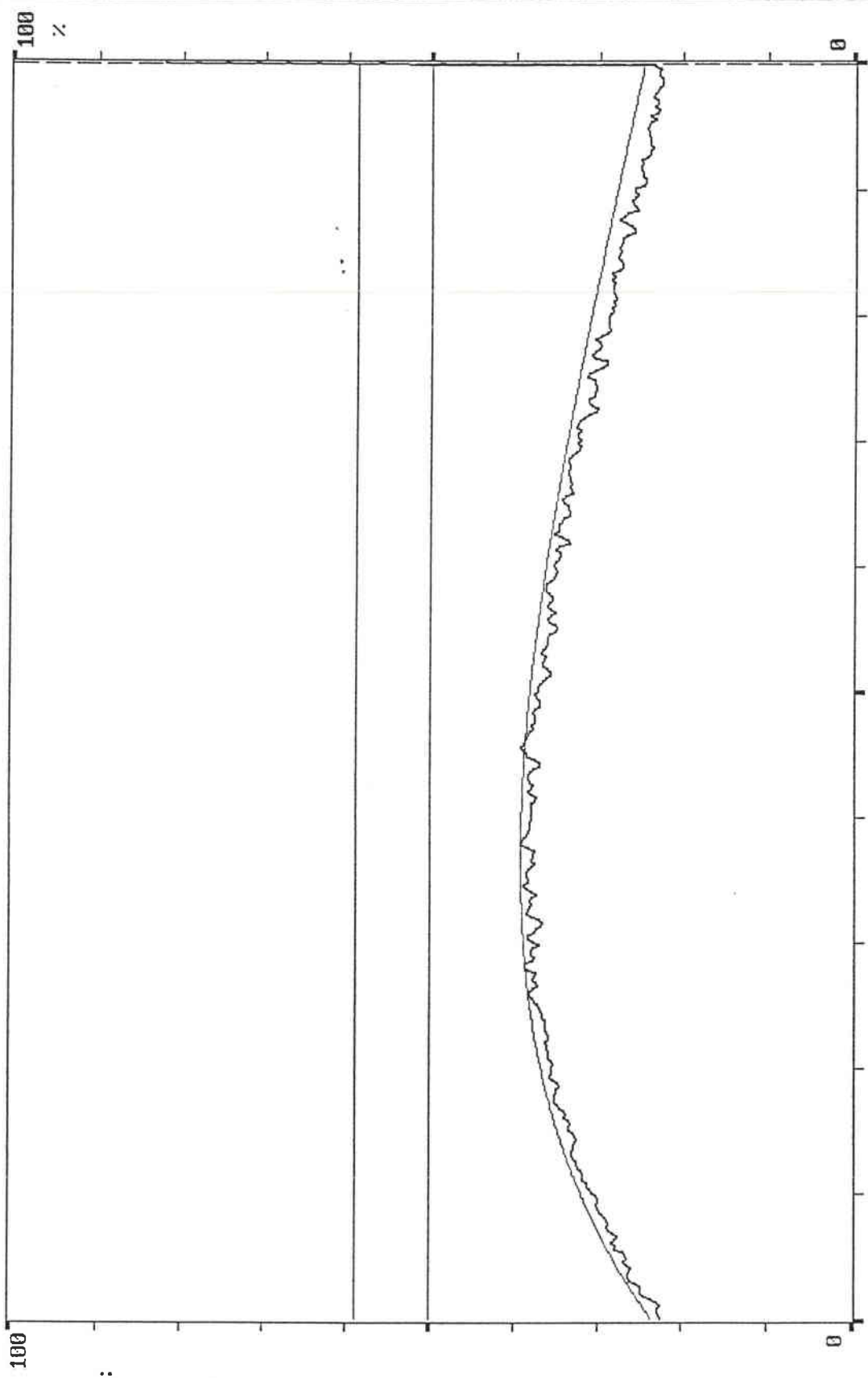
F2 F7 CtrF7 F8 CtrF8 F9 CtrF9 Enter CtrEnt F5 CtrF5 Shif5 F6 CtrF6 Shif6

FigVB 12 · Exemple courbe Teos Etch

CHAMBER B

Run: 447 / Time: 90.6 s OPEN Alarm: B

Prj Dn



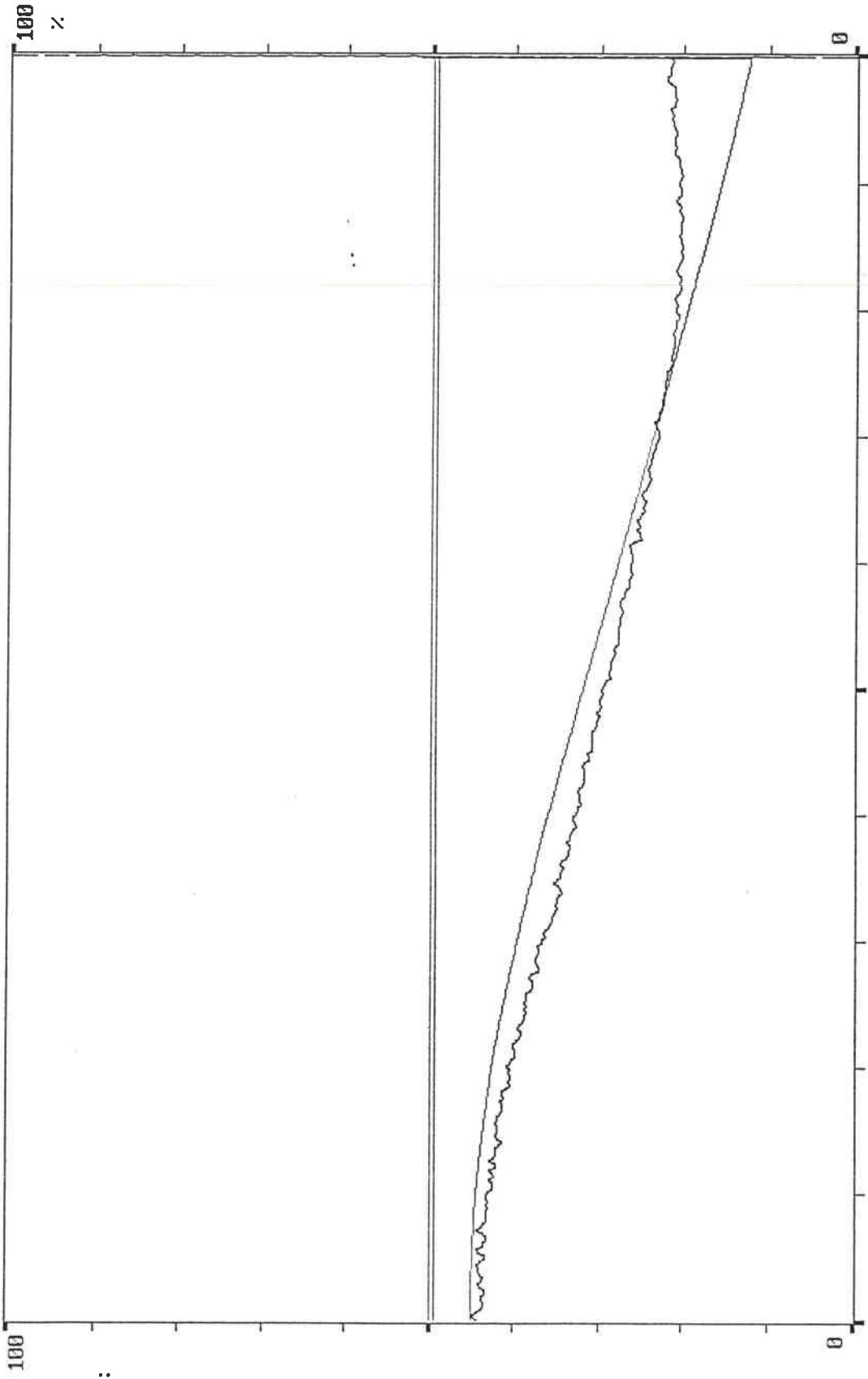
Wf ,Bat,Step,Rec:
 a01
 TOM NITRIDE
 64MB REC2 300MT
 Chamber: B

Ch.1 Ch.2
 CG: 1 CG:
 FG: 2 FG:
 851 U U

*1-ICM ThI: 1 A ThA: 1180 A ThR: 0 A Rt: 118.0 nm/mn
 2-Int. Sig: 82.2% Der1: 0 Der2: Th: nm Rt: nm/mn
 Cursor: 90.6 s
 1: s 4: s
 2: s 5: s
 3: s 6: s

Fig.IVC.7a : Spectre cannelé et modèle mathématique.

Run: 8 / Time: 87.2 s OPEN Alarm: Pg Dn



Wf, Bat, Step, Rec:

REPRO TOM
 REPRO TOM
 64MB REC2 300MT
 Chamber: B

Ch.1 Ch.2
 CG: 1 CG:
 FG: 2 FG: U
 900 U

*1-TOM ThI: 11 A ThA: 992 A ThR: 0 A Rt: 99.2 mm/mn Cursor: 87.2 s
 2-Int. Sig: 4.9 % Der1: 1624 Der2: Th: mm Rt: s
 1: s
 2: s
 3: s
 4: s
 5: s
 6: s

Fig.IVC.7b : Spectre cannelé et modèle mathématique.

CONCLUSION

La situation dans les domaines du contrôle en microtechnologie et en microsysteme évolue rapidement dans le monde et apparaît d'une importance stratégique (réduction des dimensions, des coûts, accroissement des capacités fonctionnelles). Il est donc urgent pour les industriels français de s'implanter dans ce marché encore modeste mais qui devrait croître à un rythme élevé dans les 5 ans à venir.

L'appareil proposé s'inscrit plus particulièrement dans le domaine des systèmes multifonctions. Il permet d'éviter les mesures qui se font hors des équipements de fabrication, sur des tranches prélevées dans un lot. On règle la machine en fonction des résultats de cette tranche pour passer tout le lot. Ce dernier est, en général, constitué de 25 tranches.

En outre, lors de la manipulation des tranches, il y a des risques de contamination, de perte de temps, d'erreurs, ce qui engendre un surcoût de production. De plus, la mesure sur la tranche prélevée, ne garantit pas le résultat sur chaque tranche.

Nous avons montré dans cette étude que l'interférométrie monochromatique est une méthode de mesure de variation d'épaisseur en fonction du temps.

Elle peut être absolue si la variable est (n/λ) , ce qui suppose la connaissance de l'indice et des lois de dispersion des matériaux.

Les moyens modernes d'acquisition, de traitement du signal et d'analyse permettent d'associer les deux méthodes en temps réel pour le suivi des procédés de dépôt ou de gravure de couches minces.

Ces moyens permettent, aujourd'hui, d'introduire, simultanément, le traitement de l'image fournie par une caméra CCD associée.

Pour tirer parti du diagnostic, in-situ, la première chose est de savoir positionner le spot de lumière incidente sur le site de référence .

La seconde est de disposer d'un diamètre du faisceau d'analyse qui sélectionne un empilement de couches relativement simple évitant les reliefs.

La troisième est le choix de la composition spectrale de la lumière incidente en regard du but visé.

Nous avons montré que beaucoup de montages étaient possibles, depuis le plus simple qui consiste à étudier la lumière réfléchiée par le plasma lui-même, jusqu'au plus compliqué qui associe l'imagerie, les diodes laser, les lampes spectrales halogènes et xénon.

L'originalité du montage de base proposé ici, c'est qu'il permet toutes les potentialités possibles. Il est très compact, exploite les possibilités d'une caméra CCD, des diodes laser, des fibres optiques, des sources halogène, arc UV... .

Chacune des technologies de ces sous-ensembles peut continuellement évoluer sans remettre en cause le concept et être immédiatement intégrées.

En nous appuyant sur cette méthode nous avons, outre les applications usuelles de mesures de vitesse et de détection de fin de gravure, pu apporter des solutions au monitoring de la profondeur des tranchées, des trous, et de l'aminçissement des membranes de silicium.

D'autres applications ont consistées à arrêter la gravure sur une épaisseur de matériau restante sans attendre l'interface. On a pu, aussi, mesurer, in-situ, l'uniformité d'une attaque.

L'absorption du rayonnement UV a été aussi mise à profit pour caractériser les états de surface, la stoechiométrie des matériaux, l'épaisseur d'un masque de résine, les dépôts se formant sur la surface d'un wafer pendant un procédé.

Bien qu'elle ne soit pas universelle, la méthode est puissante et apporte beaucoup d'informations.

Malheureusement, les constructeurs d'équipement de machine ferment de plus en plus leur chambre rendant les capteurs difficiles voir impossible à installer. Par la même, ils privent les utilisateurs de puissants moyens de contrôle et de diagnostic.

Il en résulte, aujourd'hui encore, un énorme gaspillage d'argent, qui se justifie par les dérives des procédés, une contamination des chambres mal ou pas contrôlée, une maintenance non adaptative, des cycles de nettoyage dangereux.

De plus, beaucoup de mesures faites en dehors des équipements peuvent être faites in-situ, donc réduction du temps de cycle, des risques d'erreurs, de la contamination.

Les avantages du suivi en temps réel, de l'interprétation des dérives des signaux permettent d'accroître le rendement des équipements et la qualité des produits, ainsi que la reproductibilité.

Fort des résultats obtenus lors de cette campagne de mesure, notre partenaire privilégié (IBM Corbeil) nous a proposé de continuer cet effort avec lui.

Ce nouveau challenge, dont nous ne doutons pas du succès, donnera l'orientation pour les quatre à cinq ans à venir et permettra l'avènement des mémoires de nouvelles générations 64 et 256 Mb.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. F.L Pedrotti et L.S Pedrotti, *Introduction to optics* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1987).
- [2]. W.A Pliskin, "Refractive Index Dispersion of dielectric films used in the semiconductor industry", *Solid State Science and Technology*, **134**, Novembre 1987).
- [3]. W.H Press, B.P Flannery, S.A Teukolsky, W.T Ketterling, *Numerical Recipe in C : Non Linear model* (Cambridge University Press, 1992).
- [4]. P. A. Heimann, R. J. Schutz, *Optical etch rate monitoring : computer simulation of reflectance* (Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974).
- [5]. Alain Delacroix, Catherine Porte, "Méthodes d'optimisation en chimie analytique", P225, 1-22.
- [6]. P. Barry Ryan, Richard L. Barr, H. David Todd, "Simplex Techniques for non linear optimization", *Analytical chemistry*, **Vol. 52**, N°9, August 1980.
- [7]. J. E. Dennis, Jr., "A user's guide to nonlinear optimization Algorithms", *Proceedings of the IEEE*, **vol. 72**, N°12, December 1984
- [8]. J.A. Melder and R. Mead, "A simplex method for function minimization" *Computer Journal*, **7**, 308-313 (1965).
- [9]. D.W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, **11**, 431-441 (1963).
- [10]. F. Abelès, "Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés. Applications aux couches minces", *Annal. de Physique*, **15**, 596-640 et 706-784 (1950).
- [11]. J. E. Besançon, *Vision par ordinateur en deux et trois dimensions*, (Eyrolles, 1988).
- [12]. R. Kleim, "Polarisation et réflexion", Cours du CNAM (1995/96).
- [13]. R. Kleim, "Interface. Cohérence", Cours du CNAM (1995/96).

-
- [14]. D.Y. Smith, E. Shiles, M. Inokoti, *The Optical Properties of Metallic Aluminium*, (Handbook of Optical Constant of Solid, 1995).
- [15]. G. Bruhat, *Cours de Physique générale-Optique*, (Masson 1992).
- [16]. S.V. Babu, M. David, R. C. Patel, "Two-step regression procedure for the optical characterization of thin films", *Applied Optics*, **30**, 839-846, (Mars 1991).
- [17]. N. Kondo, N. Fujiwara, A. Abematsu, "A study for measurement accuracy of spectroscopic thin film thickness measurement system", *Proceeding of SPIE - The International Society for Optical Engineer*, **1926**, 495-503, (1993).
- [18]. W. D. Clark, M. E. Keefer, D. M. Cook, "Film thickness measurement of amorphous silicon (using optical technique)", *Proceeding of SPIE - The International Society for Optical Engineer*, **1926**, 472-482, (1993).
- [19]. James Cameron, "Robotics in automated process tools for the FPD fab", *Solid State Technology*, Juin 1995,
- [20]. H. H. Sawin, T. J. Dalton, "Full wafer interferometry measurement for uniformity and endpoint control", *Tegal European Plasma Technology Seminar*, **6th**, (April 11, 1994).
- [21]. S. V. Babu, Moses David, Ramesh C. Patel, "Two-step regression procedure for the optical characterization of thin films", *Applied Optics*, **Vol. 30**, N°**.7**, (1 March 1991).
- [22]. Ahmed N. Natarajan et Rao K. R., "Discrete cosinus transform", *IEEE Trans.*, Janvier 1974, **C-23**, pp.90-93.
- [23]. Irving Herman, "Optical diagnostics for thin film processing", *Columbia University, New York City, Academic Press*, (October 1996).
- [24]. Helen L. Maynard et Noah Hershkowitz, "Thin-film interferometry of patterned surfaces", *Journal Vacuum Science Technology*, **Vol B13 (3)**, pp 848-857, (May-June 1995).

LISTE DES FIGURES

Fig.IB.1 : Décharge en courant continu.....	12
Fig.IB.2 : Décharges en courant alternatif.....	14
Fig.IB.3 : Décharge Radio-Fréquence.....	15
Fig.IC.1 : Caractéristique de sonde $I_s=f(V_s)$	16
Fig.ID.1 : Exemple d'équipement multi-chambres P5000 (Applied Material)....	20
Fig.IE.1 : Interféromètre simple.....	22
Fig.IE.2a et Fig.IE.2b : Interféromètre à faisceau étendu, polychromatique.....	23
Fig.IIA.1: Interférences de lames à faces parallèles.....	32
Fig.IIB.1 : Formalisme matriciel d'Abelès.....	36
Fig.IIB.2 : Boite de dialogue pour les lois de dispersion.....	42
Fig.IIB.3 : Exemple de simulation.....	44
Fig.IIB.4 : Différents indices utilisés.....	44
Fig.IIB.5 : Spectre de réflectance pour trois épaisseurs de silice différentes.....	45
Fig.IIB.6.a : Représentation spectrale en longueur d'onde de la réflectance.....	45
Fig.IIB.6.b : Représentation du spectre en nombre d'onde.....	46
Fig.IIB.7 : Empilements utilisés pour la simulation.....	47
Fig.IIB.8 : Simulation multicouche.....	47
Fig.IIC.1 : Exemple de motif à rechercher.....	52
Fig.IIC.2 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la largeur L.....	52
Fig.IIC.3 : Variation du coef. de ressemblance en fct de l'espacement E.....	52
Fig.IIC.4 : Variation du coef. de ressemblance en fct du niveau de gris de E.....	52
Fig.IIC.5 : Variation du coef. de ressemblance en fct du nombre de créneaux... ..	52
Fig.IIC.6 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la largeur L.....	53
Fig.IIC.7 : Variation du coef. de ressemblance en fct de l'espacement E.....	53
Fig.IIC.8 : Variation du coef. de ressemblance en fct du niveau de gris de E.....	53
Fig.IIC.9 : Variation du coef. de ressemblance en fct de la pente du créneau. ...	53
Fig.IIC.10 : Choix d'un bon motif.....	53
Fig.IIIA.1 : Synoptique de la mesure dimensionnelle et du positionnement.....	57
Fig.IIIA.2 : Principales caractéristiques de la lampe Xénon.....	57
Fig.IIIA.3 : Spectre de la lampe Xénon.....	58
Fig.IIIA.4 : Principales caractéristiques du module CCD VCM3250.....	58
Fig.IIIA.5 : Synoptique de la caméra.....	59
Fig.IIIA.6 : Principales caractéristiques du détecteur C5964.....	60
Fig.IIIA.7 : Principales caractéristiques de l'intensificateur.....	61
Fig.IIIA.8 : schéma général d'un système DTC.....	61

Fig.IIIA.9 : Principales caractéristiques de la carte d'acquisition.	62
Fig.IIIA.10 : Synoptique du prototype.....	65
Fig.IIIA.11 : Résultats pour les systèmes monocouches.	65
Fig.IIIA.12 : Résultats pour les systèmes multicouches.	66
Fig.IIIA.13 : Exemple de structure des tranches de production.....	66
Fig.IIIA.14 : Résultats au début de chaque étape.....	67
Fig.IIIA.15 : Résultats de mesures d'épaisseurs donnés par le Nanospec.	67
Fig.IIIB.1 : Schéma général de l'expérimentation.	69
Fig.IIIB.2 : Principales caractéristiques des moteurs pas à pas RDM544/110A.	70
Fig.IIIB.3 : Schéma du système de commande et de contrôle des moteurs pas-à-pas.	71
Fig.IIIB.4 : Principales caractéristiques de la carte de commande D225.....	71
Fig.IIIB.5 : Exemple d'image de référence.....	73
Fig.IIIB.6 : Menus du programme.	75
Fig.IIIB.7 : Exemple de résultats après recherche et positionnement.	80
Fig.IIIB.8 : Précision de la recherche.	81
Fig.IIIB.9 : Mesures de la dimension d'un pixel.	82
Fig.IIIB.10 : Recherche du motif en fonction de la rotation de l'image.	83
Fig.IIIB.11 : Calibrage rapide.....	84
Fig.IIIB.12 : Calibrage fin.....	85
Fig.IIIB.13 : Positionnement après déplacements dans une direction.....	86
Fig.IIIB.14 : Positionnement après déplacement dans différentes directions.....	87
Fig.IIIB.15 : Positionnement successifs.....	87
Fig.IIIB.16 : Chargement de motif et repositionnement.	88
Fig.IIIB.17 : Pas moteur maximum.	88
Fig.IIIB.18 : Positionnement après initialisation.....	88
Fig.IVA.1 : Système de validation méthode Simplex.....	91
Fig.IVA.2 : Exemple de structure.....	91
Fig.IVA.3 : Courbe type Recess 2.....	92
Fig.IVA.4a,b,c : Paramétrages "Recess 2".	92
Fig.IVA.5 : Simplex sur 1/4 de période.....	92
Fig.IVA.6 : Simplex sur 1/2 de période.....	92
Fig.IVA.7 : Simplex sur 2/3 de période.....	92
Fig.IVA.8a,b : Simplex sur plus d'une période.	92
Fig.IVA.9 : Performance de la méthode Simplex.....	92
Fig.IVB.1 : Système de reconnaissance d'image et de repositionnement.....	94
Fig.IVB.2 : Structure des tranches avant l'étape "RESIST ETCH".	95
Fig.IVB.3 : structure des tranches lors de l'étape "TEOS ETCH".	95
Fig.IVB.4 : Exemple de motif à reconnaître.....	96
Fig.IVB.5a : Paramétrage utilisé pour l'étape "Résine".	96
Fig.IVB.5b : Paramétrage de l'étape "Teos".	97
Fig.IVB.6 : Epaisseurs mesurées et comparaisons.....	97
Fig.IVB.7 : Corrélation entre les épaisseurs d'oxyde et de nitrure.....	98
Fig.IVB.8 : Epaisseur d'oxide corrigée de la variation d'épaisseur de la sous couche de nitrure.....	98

Fig.IVB.9 : Paramétrage du canal Emission Optique.....	100
Fig.IVB.10 : Prototype de validation en production.	100
Fig.IVB.11 : Exemple de courbe "Resine Etch".....	100
Fig.IVB.12 : Exemple de courbe "Teos Etch".....	100
Fig.IVB.13 : Prototype de validation en production avec lentille collectrice.....	101
Fig.IVC.1 : Structure "Array".....	102
Fig.IVC.2 : Exemple d'image : mémoire 64 Mb / 256 Mb	102
Fig.IVC.3 : Comparaisons mesures spectroscopiques et ellipsométriques.....	103
Fig.IVC.4 : Répétabilité de la mesures (statique)	104
Fig.IVC.5 : Répétabilité de la mesure (dynamique).....	104
Fig.IVC.6 : Epaisseur mesurée en fonction de l'épaisseur demandée	105
Fig.IVC.7a,b : Spectre cannelé et modèle mathématique	105
Fig.IVC.8 : Influence de la position du spot d'analyse sur la mesure	106

Liste des figures en Annexe :

Fig.AI.1.1 : Rayons au niveau de l'interface.

Fig.AI.2.1 : Evolution de la cathode de la lampe Xénon d'Hamamatsu.

Fig.AI.3.1 : Le transfert interligne.

Fig.AI.3.2 : Le transfert de trame.

Fig.AI.4.1 : commande de type 5H pour moteurs pas-à-pas 5 phases.

Fig.AI.4.2 : Séquence de commande pour fonctionnement en pas entiers et en demi-pas

Fig.AI.4.3 : Schéma d'une commande de puissance pour moteur pas-à-pas 5 phases.

Fig.AI.5.1 : Allure du potentiel le long de l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$.

Fig.AI.5.2 : Le mécanisme et chronogramme d'un transfert à trois phases.

Fig.AI.5.3 : Domaine de linéarité.

Fig.AI.5.4 : Intensificateur d'image.

Fig.AI.5.5 : Détail de la multiplication d'un électron dans un tunnel.

Fig.AI.6.1 : Schéma bloc de la carte d'acquisition.

Fig.AI.8.1 : Principe de la méthode Simplex.

Fig.AII.1.1 : Les différents types d'images.

Fig.AII.1.2 : Représentation de l'histogramme discret.

Fig.AII.1.3 : Différents histogrammes.

Fig.AII.1.4 : Exemples de tables de transcodage.

Fig.AII.1.5 : Histogramme de la somme d'une image avec un fond gris.

Fig.AII.2.1 : Méthode des distances.

Fig.AII.2.2 : Codification de FREEMANN.