

Rapport  
d'activité  
1988

PHYSIQUE  
DES INTERFACES  
ET DES  
COUCHES MINCES

ECOLE POLYTECHNIQUE

**E**n 1794, à l'instigation de Gaspard MONGE et de Lazare CARNOT, la Convention crée, en pleine période révolutionnaire, l'Ecole Polytechnique destinée « à former des ingénieurs en tous genres, à rétablir l'enseignement des sciences exactes et à donner une haute formation scientifique à des jeunes gens, soit pour être employés par le Gouvernement aux travaux de la République, soit pour reporter dans leur foyer l'instruction qu'ils auront reçue et y prodiguer les connaissances utiles ».

Dans un environnement aujourd'hui bien différent notre mission demeure ; le monde a changé et de si considérable façon que notre tâche est plus vaste et plus complexe.

L'Ecole Polytechnique c'est environ sept cent cinquante élèves présents à Palaiseau, plus de deux cents enseignants, près de neuf cents chercheurs, ingénieurs ou techniciens dans les laboratoires, environ cinq cents militaires et civils se consacrant à la formation des élèves et à la marche générale de l'établissement.

De cette longue tradition nous avons hérité deux principes qui guident notre action :

- l'excellence à rechercher sans cesse,
- la pluridisciplinarité pour rester ouvert aux formes multiples du savoir.

Maurice BERNARD  
Directeur de l'Enseignement  
et de la Recherche

# PHYSIQUE DES INTERFACES ET DES COUCHES MINCES

Directeur : **Bernard EQUER**

Directeur de Recherche au CNRS

Téléphone : (33) (1) 69 41 82 00

Laboratoire Associé au CNRS - SPI  
Unité propre de Recherche A 0258

## SOMMAIRE

<b>PERSONNEL DE RECHERCHE</b>	<b>2</b>
<b>EXPOSE GENERAL</b>	<b>4</b>
<b>EXPOSE ANALYTIQUE</b>	
1-PROCESSUS ELEMENTAIRES ET CINETIQUE DES PROCEDES DE DEPÔT A PARTIR DE GAZ REACTIFS	5
2- ELABORATION DE MATERIAUX AMORPHES	7
3- CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES COUCHES MINCES ET DES INTERFACES	9
4-TRANSPORT ELECTRONIQUE DANS LES SEMICONDUCTEURS AMORPHES	11
5- ELABORATION DE DISPOSITIFS	14
6- INSTRUMENTATION ET VALORISATION	14
<b>PUBLICATIONS</b>	<b>16</b>

EP - PIM - RA - - 1988

**PERSONNEL DE RECHERCHE****CHERCHEURS**

Bernard	EQUER	Docteur ès Sciences Directeur de Recherche au CNRS Directeur du Laboratoire
Gilles de	ROSNY	Docteur ès Sciences Professeur à l'Université Paris VII
Bernard	DREVILLON	Docteur ès Sciences Directeur de Recherche au CNRS Directeur du Centre de Travaux Pratiques d'Electronique de l'Ecole Polytechnique
Christian	GODET	Docteur ès Sciences Chargé de Recherche au CNRS
Jean	HUC	Docteur ès Sciences Ingénieur ESTACA Ingénieur de Recherche au CNRS
Antoine	LLORET	Docteur ès Sciences Directeur de Recherche au CNRS
Jean Yves	PAREY	Ingénieur 2 A Ecole Polytechnique
Jérôme	PERRIN	Docteur ès Sciences (X74) Chargé de Recherche au CNRS
Régis	VANDERHAGHEN	Docteur ès Sciences Directeur de Recherche au CNRS

**STAGIAIRES**

Olivier	ACHER	Boursier CIFRE, Thésard
Bruno	ALLAIN	Boursier MRT, Thésard
Nadine	BLAYO	Boursière CIFRE, Thésard
Lahzar	HADJERIS	Thésard, Boursier du Gouvernement Algérien Thèse 3ème cycle Paris VI
Amina	LABDI	Docteur de l'Université Paris VII, Boursière du Gouvernement Algérien
Ahmed	MOURCHID	Boursier MRT, Thésard
Slaheddine	NAJAR	Docteur 3ème Cycle, Boursier CCE, Thésard
Pere	ROCA i CABARROCAS	Docteur de l'Université Paris VII, Boursier AFME en séjour post-doctoral à Princeton depuis Septembre 88
Michel	STCHAKOVSKY	Boursier CIFRE, thésard Ingénieur ISMRA

**VISITEURS**

Takashi	FUYUKI	Faculty of Engineering	Kyoto University
Satyendra	KUMAR	Indian Institute of Technology	New Delhi India
Zong Yan	WU	Institute of Ceramics	Shanghai Chine

**INGENIEURS, TECHNICIENS, ADMINISTRATIFS**

Dominique	CONNE
Liliane	JOUHAUD
Jean Luc	MONCEL
Marie-Josèphe	SURMONT

## EXPOSE GENERAL

L'activité du Laboratoire, initialement axée sur l'élaboration par technique plasma de semi-conducteurs amorphes et sur leur emploi pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, s'est depuis sensiblement élargie. Les objectifs portent désormais sur les problèmes des couches minces amorphes semiconductrices ou isolantes avec un fort accent sur la compréhension des rapports existant entre les propriétés physico-chimiques intervenant dans le dépôt de la couche et les propriétés optiques et électriques qui en résultent pour celle-ci.

Le programme de recherche porte pour l'essentiel sur les couches minces et les interfaces de matériaux semiconducteurs amorphes: le silicium et les alliages silicium-germanium, silicium-carbone, silicium-azote. Il se divise entre les études portant sur l'**élaboration** de ces couches, où deux méthodes sont utilisées : les plasmas et la photochimie et l'**analyse des propriétés des couches**, en particulier leurs **propriétés électriques**. Enfin, la production et l'optimisation de **dispositifs** constitue un troisième axe, qui recoupe les deux précédents dans la mesure où ces dispositifs sont en grande partie destinés aux études, hormis quelques prototypes de photopiles solaires ou de détecteurs de particules chargées. Une des approches originales a consisté dans le développement de méthodes d'analyse in-situ spécifiques qui ont conduit à une activité **d'instrumentation** avec un partenaire industriel.

En termes de finalités d'application, ce programme reste encore très marqué par la conversion photovoltaïque, qui a joué un rôle unificateur dans le choix des thèmes de recherche et qui a suscité une importante activité nationale, avec l' "ARC Silicium amorphe" du CNRS/PIRSEM, et européenne avec les programmes de la CCE. Cependant, les approches et les techniques développées pour l'étude de matériaux photovoltaïques sont maintenant largement tournées vers d'autres applications, qui génèrent à leur tour d'autres problèmes scientifiques. C'est le cas par exemple, d'une collaboration avec le CNET (Lannion) axée sur la compréhension de certaines interfaces de couches très minces (300Å) qui se rencontrent dans la technique des "écrans plats" à cristaux liquides.

Cette évolution des objectifs d'application va en parallèle avec celle de la problématique scientifique. Si l'on peut dire que l'essentiel des propriétés des semiconducteurs amorphes de la colonne IV est aujourd'hui compris, il reste néanmoins de larges pans d'obscurité : ainsi la nature profonde des transitions responsables de leur métastabilité (effet Staebler-Wronski) ou le mode d'incorporation des atomes dopants ne sont pas clairement établis. Les problèmes d'interfaces de ces matériaux sont encore plus ouverts. Leur intérêt est évident mais ils sont d'une complexité qui a jusqu'ici découragé les chercheurs. C'est un champ que le développement d'approches expérimentales appropriées rend enfin accessible et qui va constituer un thème privilégié pour les prochaines années. Il débouche sur l'étude des structures multicouches dont l'intérêt est aussi grand pour les applications que pour la compréhension fondamentale de la matière à l'état désordonné.

## EXPOSE ANALYTIQUE

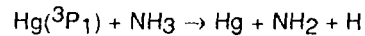
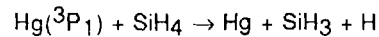
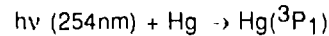
### 1 Processus élémentaires et cinétique des procédés de dépôt à partir de gaz réactifs

#### 1.1 Mécanismes réactionnels en photochimie (J. PERRIN, B. ALLAIN ET T. FUYUKI)

Des couches de nitrure de silicium sont obtenues par décomposition photochimique d'un mélange d'ammoniac  $\text{NH}_3$  et de silane  $\text{SiH}_4$ , par une lampe UV à vapeur de Hg, émettant à 185 et 254nm. Deux types de procédés sont exploités:

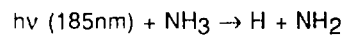
*la photosensibilisation par le mercure, et la photolyse directe.*

Dans le cas de *la photosensibilisation*, les photons à 254nm sont absorbés par des atomes de Hg véhiculés par le gaz à décomposer, et la dissociation résulte d'un transfert d'excitation des atomes de Hg excités par collision:

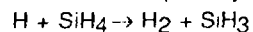


Il faut aussi tenir compte des états métastables  $\text{Hg}(^3\text{P}_0)$  qui sont peuplés par collision de  $\text{Hg}(^3\text{P}_1)$  sur  $\text{NH}_3$ , par l'intermédiaire d'un complexe moléculaire excité  $(\text{HgNH}_3)^*$ . Nous avons déterminé les constantes de vitesse et les sections efficaces de collision pour le "quenching" de  $\text{Hg}(^3\text{P}_1)$  et  $\text{Hg}(^3\text{P}_0)$  par  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{SiD}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{H}_6$ , et  $\text{GeH}_4$ , en mesurant l'intensité de fluorescence à 254nm, correspondant à la désexcitation radiative de  $\text{Hg}(^3\text{P}_1)$ , ainsi que l'intensité de luminescence à 340nm, correspondant à la désexcitation du complexe  $(\text{HgNH}_3)^*$ . Ces résultats ont été ensuite incorporés dans un modèle cinétique pour rendre compte de la vitesse de dépôt et de la stoechiométrie N/Si des couches déposées dans un réacteur photochimique. Le modèle traite le transfert radiatif depuis la lampe dans le réacteur, la création et les réactions successives des diverses espèces ( $\text{Hg}(^3\text{P}_1)$ ,  $\text{Hg}(^3\text{P}_0)$ , H,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{SiH}_3$ ...) et leur diffusion vers les parois, assortie de conditions aux limites en terme de probabilité de réaction et de collage sur la couche en cours de croissance.

Dans le cas de *la photolyse*, en l'absence de mercure, seule la raie à 185nm est absorbée par  $\text{NH}_3$ :



et le silane est dissocié par l'hydrogène atomique



Là encore, un modèle cinétique a été mis au point.

Afin de tester la validité de ces modèles numériques, une expérience est en cours pour mesurer la concentration de  $\text{NH}_2$  par fluorescence induite par laser (F.I.L.). De plus un dispositif de photolyse-flash est en cours de montage pour disposer d'une source pulsée de  $\text{NH}_2$  et faire des études cinétiques résolues en temps par F.I.L.

#### 1.2 Etude et modélisation de la transition $\alpha$ - $\gamma$ dans les décharges radio-fréquence de silanes

(J. PERRIN, B. ALLAIN et P. ROCA, CARARROCAS en collaboration avec le Centre de Recherches Claude-Delorme de L'AIR LIQUIDE)

En étudiant les cinétiques de dépôt de a-Si:H par plasma de décharge rf de  $\text{SiH}_4$  et  $\text{Si}_2\text{H}_6$ , nous avons mis en évidence une transition brutale de régime de décharge qui se traduit par une augmentation d'un facteur 4 de la vitesse de dépôt à une pression caractéristique du gaz

(0.14Torr pour  $\text{SiH}_4$  et 0.05Torr pour  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ) pour une même puissance rf couplée au plasma. Cette transition correspond à un changement du mode de couplage de l'énergie aux électrons. Dans le régime  $\alpha$  à basse pression avant la transition, c'est l'effet de "surf" des électrons sur le front des gaines de charge d'espace qui oscillent à la rf. En revanche dans le régime  $\gamma$ , c'est l'accélération des électrons secondaires émis par les parois sous l'effet du bombardement par les ions. Le calcul de la pression de transition par un modèle de comportement des gaines au bord du plasma, est en excellent accord avec les valeurs mesurées.

En ce qui concerne le matériau, la transition  $\alpha - \gamma$  se traduit par une diminution des performances optoélectroniques et par un accroissement de la rugosité et de la porosité des couches. L'étude de cette transition va se poursuivre.

Plus largement, un programme européen de diagnostics et de modélisation des décharges rf dans le silane, incluant les aspects électriques, physico-chimique et d'écoulement des gaz, est en train de voir le jour

### 1.3 Analyse de la composition en radicaux libres dans les plasmas. (A. LLORET en collaboration avec le Laboratoire de Photophysique Moléculaire d'ORSAY)

Il s'agit d'une expérience originale qui a permis la détection par absorption infrarouge des radicaux libres d'un plasma après leur piégeage dans une matrice d'Argon solide. Les radicaux de plasmas de silane, disilane, trisilane et germane ont ainsi été détectés pour la première fois. La comparaison des spectres IR des radicaux de silane produits dans un plasma de très basse pression de silane pur et avec du NO, a permis l'identification des principales raies d'absorption des radicaux  $\text{SiH}_2$  et  $\text{SiH}_3$ . Ceci a été rendu possible par le fait que la présence de NO dans un plasma de silane modifie la nature du dépôt sur les parois, et par conséquent les effets des réactions des radicaux avec celles-ci. Les raies d'absorption des radicaux de germane ont été aussi étudiées en suivant leur évolution au cours d'un recuit de la matrice d'Argon à 30K. Dans ce cas la diffusion des espèces dans la matrice augmente, de même que les probabilités de réaction radical-molécule.

### 1.4 Réactions de surface du radical $\text{SiH}_3$ et effet catalytique du diborane. (J. PERRIN pendant un séjour au Electrotechnical Laboratory de TSUKUBA (Japon))

Nous avons montré antérieurement que la probabilité de réaction  $\beta$  du radical  $\text{SiH}_3$  sur le silicium amorphe hydrogéné ( $\alpha\text{-Si:H}$ ) en cours de croissance se situe entre 0.1 et 0.25 suivant la température de dépôt, tandis qu'une fraction  $1-\beta$  est réfléchiée ou désorbée en phase gazeuse. En outre, seule une fraction  $s<\beta$  des radicaux ayant réagi va se chimisorber (collage) et contribuer ainsi à la croissance de la couche de  $\alpha\text{-Si:H}$  par incorporation du silicium; la fraction restante ( $\gamma=\beta-s$ ) correspond à la recombinaison de  $\text{SiH}_3$ , pour partie en  $\text{Si}_2\text{H}_6$ , et surtout en  $\text{SiH}_4$  par abstraction d'un atome d'hydrogène de la surface.

Nous avons développé un modèle cinétique reposant sur l'hypothèse d'un "état précurseur" de  $\text{SiH}_3$  physisorbé sur les sites saturés par l'hydrogène. Dans cet état précurseur, le radical peut migrer de site en site et occasionnellement se recombinaison ou se chimisorber sur un site non hydrogéné. Selon ce modèle, la cinétique réactionnelle dépend largement de la température et du taux de couverture de la surface par l'hydrogène. Or, en étudiant l'effet catalytique du diborane ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) qui, en très faible concentration dans le silane, entraîne un accroissement d'un facteur 2 de la vitesse de dépôt de  $\alpha\text{-Si:H}$ , nous avons pu mettre en évidence une augmentation du rapport  $s/\beta$  pour  $\text{SiH}_3$ , ce qui implique une diminution de la fraction  $\gamma$  relative à la recombinaison. Ceci peut s'interpréter comme une diminution du taux de couverture en hydrogène induite par le diborane, ce qui diminue la migration et la recombinaison de surface de  $\text{SiH}_3$  en faveur de la chimisorption, et offre une confirmation a posteriori de la validité des hypothèses du modèle. Le mécanisme catalytique de déshydrogénation de la surface par le diborane est lui aussi interprété.



## 2 Elaboration de semi-conducteurs amorphes

Les techniques d'élaboration de semiconducteurs en couches minces par des décharges dans des gaz moléculaires tels que le silane  $\text{SiH}_4$ , le germane  $\text{GeH}_4$  (auxquels on ajoute éventuellement du diborane  $\text{B}_2\text{H}_6$  ou de la phosphine  $\text{PH}_3$  pour assurer un dopage de type p ou n du semiconducteur) ont fait la preuve de leur supériorité sur les autres techniques (CVD, pulvérisation cathodique) pour la réalisation de matériaux de haute qualité. Mais la nature des mécanismes élémentaires mis en jeu dans ces décharges est restée longtemps obscure, ce qui a justifié d'importants efforts de recherche et la mise en place d'une Action de Recherche Concertée (ARC Silicium Amorphe). Afin de fournir à cette dizaine de laboratoires des matériaux et des dispositifs de haute qualité, la construction d'un réacteur de dépôt de référence a été décidée en 1985. Financé par l'AFME, le PIRSEM (CNRS) et TOTAL, ce réacteur, l'ARCAM, a une structure originale : c'est un réacteur à plasma radio-fréquence équipé de plusieurs chambres à plasma, dans une unique enceinte à vide isotherme. Cette disposition minimise les effets de contamination des couches intrinsèques, produites dans l'une des chambres, par les dopants p ou n introduits dans des chambres distinctes. Cette structure combine les avantages des réacteurs multichambres classiques, où chaque chambre est située dans une enceinte à vide séparée, avec une plus grande simplicité de réalisation et la possibilité de déplacer facilement les échantillons d'une chambre à l'autre, ce qui permet la réalisation de dispositifs multicouches.

### 2.1 Synthèse de silicium amorphe hydrogéné et d'alliages silicium-germanium par plasma radio-fréquence. (C. GODET, A. LLORET, P. ROCA i CABARROCAS)

Les premiers dépôts de silicium amorphe réalisés dans le réacteur ARCAM ont été obtenus en 1985. Depuis un programme d'optimisation des couches a permis d'une part d'adapter et d'analyser les particularités du réacteur et d'autre part de produire de façon reproductible des matériaux d'excellente qualité. Celle-ci est bien caractérisée par la densité d'états au niveau de Fermi obtenue par conductivité SCLC ( $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ ) et par la densité de liaisons brisées obtenue par RPE ( $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ).

Dans l'étude des alliages, l'objectif est de produire un matériau ayant une bande interdite bien adaptée à la conversion du rayonnement solaire tout en conservant des propriétés de transport électronique satisfaisantes. Les alliages a-Si Ge:H sont obtenus à partir de mélanges  $\text{SiH}_4/\text{GeH}_4$  dilués dans différents gaz porteurs (hydrogène, hélium, argon). En parallèle avec une optimisation des paramètres expérimentaux, des caractérisations approfondies ont été effectuées par les laboratoires membres de l'ARC Silicium Amorphe, aboutissant à des couches de bonne qualité. Le germanium amorphe obtenu dans l'ARCAM est comparable aux meilleurs matériaux décrits dans la littérature :  $10^{17}$  liaisons brisées/cm<sup>3</sup>. Les propriétés des alliages sont sensiblement moins bonnes que celles de a-Si:H en raison d'une densité importante de microstructures. Celles-ci sont révélées par les propriétés des atomes d'hydrogène qui les décorent. Les conditions de dépôt qui minimisent ces microstructures correspondent à une optimisation de la mobilité de surface des espèces réactives qui participent à la croissance ; en particulier la dilution du mélange gazeux dans 90% de  $\text{H}_2$  permet de réaliser des alliages a-Si Ge:H incorporant jusqu'à 30% de Germanium (le gap optique variant de 1.9 à 1.7 eV) sans dégradation significative du transport électronique. L'étude sera poursuivie en 1989; elle fait partie d'un contrat européen de la CEE (Programme AMOR de la DGXII).

### 2.2 Rôle du bombardement ionique sur la croissance et les propriétés d'alliages silicium-germanium (J. PERRIN pendant un séjour au Electrotechnical Laboratory de TSUKUBA (Japon))

L'influence du bombardement ionique sur la croissance des alliages silicium germanium a été étudiée en utilisant un dispositif triode où le plasma de décharge rf est confiné par une électrode-grille, ce qui permet de polariser le substrat sous-jacent sans perturber la décharge. L'énergie

des ions, mesurée par un analyseur électrostatique a été variée de 0 à 100eV. pour un flux d'ions pouvant représenter jusqu'à 25% du flux total déposé à partir d'un mélange silane-germane à basse pression (20 mTorr). Le bombardement ionique permet d'accroître la densité du matériau, et de modifier le mode d'incorporation d'hydrogène tout en entraînant un rétrécissement de la bande interdite pour une même stoechiométrie en Si et Ge. Ceci ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer les performances des alliages à bande étroite.

### 2.3 Synthèse et étude des couches de bore amorphe hydrogéné (C.GODET en collaboration avec le Laboratoire des Solides Irradiés - Ecole Polytechnique ).

La préparation de couches minces protectrice nécessite la mise en oeuvre d'éléments chimiques de faible masse atomique : bore, carbone, azote... La décomposition assistée par plasma du diborane ( $B_2H_6$ ) dilué dans l'hydrogène conduit à la formation de couches minces de bore amorphe hydrogéné a-B:H. Les premières analyses de couches déposées à basse température (50-100°C pour éviter la décomposition purement thermique) mettent en évidence une concentration d'hydrogène élevée et une faible absorption optique UV-visible. Soumis à l'atmosphère ambiante, ce matériau subit une hydrolyse rapide. La cristallisation thermique intervient seulement au-dessus de 1000°C.

### 2.4 Etude du dopage p<sup>+</sup> par sonde de Kelvin in situ. (WU ZONG-YAN, A. LLORET et B. EQUER en collaboration avec SOLEMS SA)

Le dopage p des couches de silicium amorphe hydrogéné se fait habituellement en ajoutant du diborane au silane. Cependant, l'utilisation du diborane présente de nombreux problèmes liés à la complexité de la chimie du bore et aux effets associés à la dissociation thermique de cette molécule. C'est pourquoi l'emploi d'autres gaz a été proposé : le triméthyl-bore et le triméthyl-gallium. Les effets dopants de ces gaz ainsi qu'une éventuelle contamination par CVD sont étudiés et comparés à ceux du diborane au moyen d'une sonde de Kelvin in-situ qui permet de suivre l'évolution du niveau de Fermi au cours de l'élaboration de la couche, d'analyses SIMS qui renseignent sur l'incorporation de bore dopant et non-dopant, et enfin par l'étude de dispositifs fabriqués avec l'ARCAM.

### 2.5 Incorporation d'oxygène dans le silicium amorphe à partir de siloxanes en impuretés dans le silane (J. PERRIN, J.B. CHEVRIER, C. GODET en collaboration avec le Centre de Recherches Claude-Delorme de L'AIR LIQUIDE)

Afin de tester le rôle des impuretés de siloxanes contenues dans les bouteilles de silane par leur effet sur les propriétés des couches de a-Si:H déposées par plasma, L'Air Liquide a fourni une série de bouteilles de concentrations connues de siloxanes dans la gamme de 1 à 500 ppm. Des couches de a-Si:H et des photopiles p-i-n ont été réalisées dans la machine ARCAM et leurs propriétés physico-chimiques et électriques ont été analysées. Les faibles quantités d'oxygène incorporées dans les couche ont été mesurées par absorption IR et par SIMS. Cette étude se poursuit en 1989 par l'étude du vieillissement des cellules sous éclairage

### 2.6 Etude in-situ de La décomposition thermique du diborane. (P. ROCA I CABARROCAS, S. KUMAR et B. DREVILLON)

Le diborane ( $B_2H_6$ ) est introduit dans la décharge de silane afin de réaliser le dopage p du a-Si:H. Or, du fait de son instabilité, le diborane peut être décomposé thermiquement (CVD) en l'absence de plasma. Cet effet a été étudié in-situ en combinant ellipsométrie spectroscopique et sonde de Kelvin. La sonde de Kelvin, étant directement sensible au dopage, permet la mise en évidence de la CVD à basse pression en l'absence de tout dépôt de couches. Le procédé de CVD est considérablement accentué à haute pression. De manière générale, cette décomposition thermique

peut avoir des conséquences technologiques fâcheuses (recyclage de verre par le plasma de silane, dégradation des interfaces...).

### 3 Caractérisations physico-chimiques des couches minces et des interfaces

La contribution originale du laboratoire porte tout d'abord sur les études in-situ, c'est à dire effectuées pendant la croissance des couches par plasma radio-fréquence ou par photodissociation. L'ellipsométrie cinétique dans le visible et l'UV permet de suivre l'évolution du matériau, au niveau de quelques monocouches, et renseignent également sur l'état de la surface libre. Au cours de l'année 1988, on a, pour la première fois, conjugué cette approche avec le suivi in-situ de l'évolution du travail de sortie du matériau par une sonde de Kelvin (encore appelée méthode de la capacité vibrante).

#### 3.1 Etude in-situ des interfaces Oxyde Transparent Conducteur / a-Si:H ( B. DREVILLON, J. HUC, S. KUMAR, P. ROCA I CABARROCAS en collaboration avec SOLEMS, le CNET-Lannion et SAINT GOBAIN)

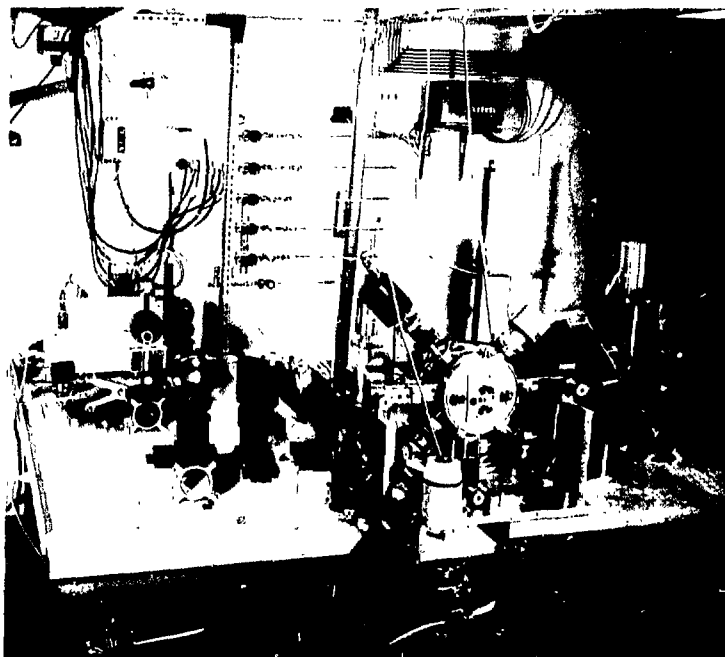
Dans les applications pratiques, le a-Si:H est déposé sur un substrat de verre recouvert d'une couche transparente conductrice (OTC), ces matériaux étant généralement des oxydes (d'indium, d'étain ou de zinc). Or, le plasma de silane utilisé pour le dépôt de a-Si:H étant très réducteur, il y a un risque d'interaction chimique durant les premières secondes de la croissance du a-Si:H. Cette réduction du substrat peut avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement des composants (perte de transmission, recombinaison des porteurs). C'est pourquoi cette étude a été réalisée en collaboration avec les industriels Français impliqués dans ce domaine : Solems SA (photopiles solaires), CNET-Lannion (transistors pour écrans de visualisation) et Saint-Gobain (substrats OTC).

L'étude in-situ des interfaces OTC/a-Si:H a été effectuée en combinant deux diagnostics très sensibles : l'ellipsométrie spectroscopique (UV-visible) et la sonde de Kelvin. L'ellipsométrie a permis la mise en évidence d'une réduction partielle (pendant quelques secondes) des substrats d'oxyde d'indium et d'étain à haute température. Au contraire l'oxyde de zinc est très résistant à l'attaque d'un plasma réducteur. Dans tous les cas, la morphologie de surface (rugosité) du substrat influence considérablement la croissance ultérieure du a-Si:H. La conséquence de cette interaction chimique est l'apparition d'une barrière de potentiel à l'interface OTC / a-Si:H, mise en évidence par les mesures de sonde de Kelvin.

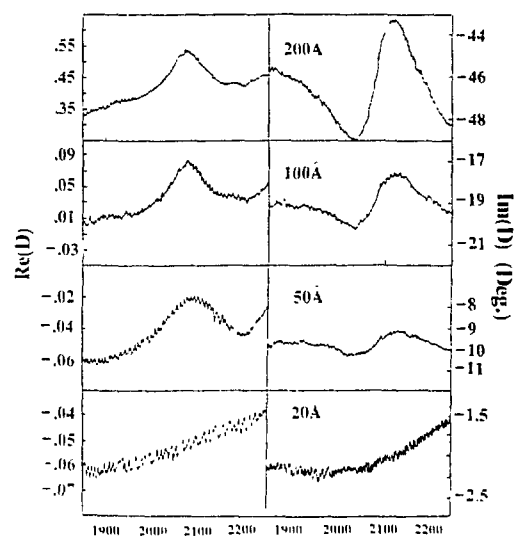
#### 3.2 Analyse des interfaces Oxyde Transparent Conducteur/a-Si:H par pulvérisation ionique (J. PERRIN, S. KUMAR en collaboration avec G. BLAISE du Laboratoire de Physique des Solides d'ORSAY)

Les interfaces OTC/a-Si:H ont été analysées par des méthodes de pulvérisation ionique associée à de la spectrométrie de masse telles que la SIMS ou la STIMS (Secondary Thermal Ionisation Mass Spectrometry) développée à Orsay. En fait, la largeur mesurée de l'interface ne correspond bien à l'interface réelle que pour les dépôts en couche très minces ( moins de 200 Å) de a-Si:H. Dans ces conditions on observe, seulement dans le cas des substrats d'oxyde d'indium à haute température, un étalement de la concentration d'indium qui corrobore l'observation d'une réduction partielle par les techniques in situ mentionnées ci-dessus. En revanche pour les couches épaisses de a-Si:H, la largeur mesurée résulte essentiellement de la rugosité induite par la pulvérisation ionique et augmente proportionnellement à la racine carrée de l'épaisseur selon un modèle statistique.

## L'ellipsométrie Infrarouge



On voit au centre de la photo le réacteur plasma où sont élaborées les couches sur un substrat vertical. Le faisceau d'analyse entre par la droite (on distingue à droite du réacteur, le modulateur photo-élastique) et sort par la gauche pour être analysé dans un monochromateur.



Spectres ellipsométriques en fonction du nombre d'ondes en  $\text{cm}^{-1}$ , obtenus sur des couches minces d'alliage  $\text{a-Si}_{0.75}\text{C}_{0.25}:\text{H}$ . On identifie clairement la bande d'absorption de la vibration de valence  $\nu\text{SiH}$  dans les couches d'épaisseur supérieure à 20 Å. On peut observer un déplacement de cette bande par rapport à sa position dans  $\text{a-Si}:\text{H}$  dû à l'introduction de carbone dans la matrice.

### 3.3 Analyse par ellipsométrie infrarouge in-situ des propriétés vibrationnelles des couches minces de a-Si:H (N. BLAYO, J. HUC et B. DREVIILLON)

Les propriétés vibrationnelles de couches très minces (quelques nanomètres) de a-Si:H et d'alliages ont été étudiées en 1987. Dans ce cas, les mesures n'étaient pas effectuées in-situ. En 1988, l'ellipsomètre IR a été couplé à un réacteur à plasma de silane. Par ailleurs, l'appareil a été entièrement revu tant du point de vue optique qu' informatique. En particulier sa gamme spectrale a été portée à 11  $\mu\text{m}$ .

### 3.4 Etude du décapage de surface de GaAs (001) sous irradiation UV en présence d'ammoniac et de l'interface entre GaAs et nitrure de silicium déposé par photolyse d'un mélange ammoniac/silane (B. ALLAIN, J. PERRIN en collaboration avec le LCR de THOMSON-CSF)

La réalisation de circuits intégrés à base de GaAs nécessite de "passiver" la surface du semiconducteur par dépôt de nitrure de silicium. Mais il faut au préalable décaper la surface de ses oxydes natifs de gallium et d'arsenic, et déposer dans des conditions "douces" pour ne pas détériorer la structure cristalline superficielle. La décomposition photochimique de  $\text{NH}_3$  et de  $\text{SiH}_4$  par une lampe à vapeur de Hg émettant à 185nm permet de remplir les deux fonctions successivement. Pour le décapage de surface on photolyse  $\text{NH}_3$  pur, ce qui produit des atomes d'hydrogène H qui réduisent les oxydes et des radicaux  $\text{NH}_2$  qui stabilisent la surface en formant en particulier un nitrure de gallium GaN. Puis on enchaîne un dépôt de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  simplement en rajoutant du silane à l'ammoniac. L'analyse de la composition chimique de la surface de GaAs avant et après décapage et sous une couche de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  a été faite par spectroscopie et diffraction de photoélectrons X. De plus, des mesures électriques de caractéristiques capacité-tension à haute fréquence sur des structures métal/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ /GaAs ont montré une nette réduction de la densité d'états électroniques d'interface grâce au décapage.

## **4 Transport électronique dans les semiconducteurs amorphes**

Les études in-situ sont complétées par des mesures ex-situ, portant sur des dispositifs achevés et visant surtout à la compréhension du transport électronique. Elles comportent deux volets, l'un constitué de mesures des paramètres du transport électronique : mobilité, durées de vie et taux ou vitesses de recombinaison, et l'autre d'expériences destinées à mesurer les profils de champ électrique dans des structures de jonction ou d'hétéro-jonction.

### 4.1 Etude des propriétés de transport électronique par "temps de vol". (R. VANDERHAGHEN en collaboration avec le LGEP ,

La conductivité dans les semiconducteurs amorphes met en jeu des mécanismes de transport très différents de ceux que l'on connaît pour les cristallins. A la température ambiante, on admet aujourd'hui que les mécanismes dits "de piégeage multiple" dominent. Les principaux paramètres contrôlant la conductivité sont la densité d'états dans la bande interdite, les sections efficaces de capture de ces états et la mobilité dans les états étendus. Selon leur position dans la bande interdite, le rôle de ces pièges, plus ou moins localisés, est très différent et des expériences distinctes doivent être réalisées pour accéder à la totalité de la distribution. Dans les expériences "temps de vol", on mesure le courant (forme en fonction du temps, valeur absolue, charge collectée) induit par le déplacement des charges dans un champ électrique : ces porteurs, photogénérés près d'une interface par un pulse laser, se déplacent à travers une couche de quelques micromètres. Les expériences, particulièrement sensibles à la densité d'états peu en dessous du seuil de mobilité, sont éventuellement perturbées par le champ interne, la recombinaison d'interface, la charge d'espace.

Des expériences ont été réalisées en collaboration avec le LGEP pour étudier les propriétés de transport, tant pour les électrons que pour les trous, dans le silicium amorphe hydrogéné et ses alliages avec le germanium. Il apparaît que la densité d'états de la bande de conduction est formée

de deux exponentielles ; cette densité s'élargit quand la température de dépôt diminue ou quand le germanium est présent . L'alliage avec le germanium fait aussi apparaître une queue vers 350 meV. La densité d'états des trous est exponentielle, avec une queue qui apparaît aussi quand le germanium est présent.

Pour cette étude, deux méthodes analytiques ont été développées: transformée de Fourier de la dérivée du courant, analyse de la pente avant le transit. Une méthode de simulation numérique, prenant en compte la diffusion et le champ interne, a aussi été élaborée. Une méthode de transport avec un double pulse a été développée pour étudier la durée de vie et la densité d'états profonds. Enfin, le champ interne des dispositifs et la recombinaison d'interface sont en cours d'étude en analysant la charge collectée. Dans le cas d'un dispositif double Schottky, il est possible d'obtenir la densité d'états au niveau de Fermi.

#### 4.2 Etude du piègeage par spectroscopie femtoseconde (A. MOURCHID, R.VANDERHAGHEN) en collaboration avec D. HULIN du Laboratoire d'Optique Appliquée)

Le LOA a développé un instrument de spectroscopie femtoseconde par faisceaux laser "pompe" et "test", permettant d'étudier réflectivité et transmission optique d'un échantillon en fonction du temps, de la longueur d'onde d'analyse et de l'énergie déposée par la pompe. Ceci permet d'étudier les parties réelles et imaginaires de l'indice optique. L'objectif est d'étudier la thermalisation, la recombinaison et le piègeage des porteurs en fonction de la nature du matériau (Silicium amorphe hydrogéné ou alliages ). La connaissance de l'ordre de grandeur du temps de piègeage des porteurs permettrait de préciser la forme de la densité d'états étudiée par "temps de vol". L'effet d'échauffement très rapide de l'échantillon (de l'ordre de la picoseconde) apparaît déjà jouer un rôle très important, qui peut dans certains cas masquer d'autres effets.

#### 4.3 Etude de l'influence des interfaces sur les propriétés de transport (A.LABDI, G.DE ROSNY, B.EQUER)

Les structures n<sup>+</sup>i/n<sup>+</sup> ne mettent en oeuvre que le transport d'électrons. Cette situation relativement simple autorise une interprétation détaillée des caractéristiques courant-tension de ce type de dispositif. Grâce à de très bons travaux sur ce sujet, on dispose d'un moyen éprouvé pour évaluer la densité d'états au niveau de Fermi fondé sur l'interprétation de ces caractéristiques courant-tension. Les modèles actuels évitent les difficultés causées par les deux interfaces en supposant que la couche i est assez épaisse pour que l'effet de volume prédomine. Le travail qui a été réalisé visait à aborder le problème du comportement des interfaces en se plaçant dans la situation opposée, c'est à dire où l'épaisseur de la couche intrinsèque est suffisamment mince. Ceci posait à la fois des problèmes expérimentaux, réalisation de dispositifs convenables, mesures de caractéristiques à des polarisations extrêmement faibles et des problèmes de modélisation du comportement des interfaces. On a pu montrer que la prise en compte des interfaces permettait d'expliquer un certain nombre de faits expérimentaux tels que la variation de l'énergie d'activation du courant en mode ohmique ou l'apparente variation de la densité d'états dans les couches relativement minces (c'est à dire de 0,1 à quelques microns). Sur le plan pratique, on a montré qu'il devenait possible d'utiliser des structures de moins de un micron pour la détermination de la densité d'états au niveau de Fermi. Enfin, le rôle de la diffusion a été pris en compte explicitement dans l'analyse et on a vérifié qu'il n'était pas déterminant dans les structures et avec les matériaux utilisés.

#### 4.4 Electroréflectance dans les couches de semi-conducteurs amorphes (L.HADJERIS, G.de ROSNY, B.EQUER)

On peut penser tirer parti de la dépendance de la constante diélectrique du silicium amorphe avec le champ électrique pour sonder le profil de champ dans un dispositif par un moyen optique. L'expérience mise en oeuvre consiste à mesurer la variation de l'amplitude réfléchie lorsque l'on soumet une diode à une polarisation alternative, le rapport des composantes à la fréquence d'excitation et à son harmonique d'ordre 2 est fonction du champ interne statique et de la longueur d'onde de la lumière sonde. Il est en principe possible de déduire le profil de champ interne de la

mesure de ce rapport pour diverses longueurs d'onde. La détermination de l'amplitude réfléchie implique une mesure de la phase, que l'on détermine à partir d'un montage interférométrique de type Michelson. L'expérience est délicate à mener, l'essentiel des nombreux problèmes instrumentaux est maintenant résolu. Il s'avère que le montage est sensible à la variation d'épaisseur de l'échantillon, induite par la pression électrostatique, ce phénomène parasite a été étudié en détail pour que l'on puisse s'en affranchir, il nous permet en réalité de mesurer le module d'élasticité des couches de silicium amorphe, dont la variation en fonction des conditions de préparation et des perturbations imposées aux couches peut donner des indications sur les modifications des liaisons chimiques du matériau et son état de contrainte mécanique. Actuellement, le phénomène d'électroréflexance dans le silicium amorphe est réanalysé en détail, notre appareillage étant en effet beaucoup plus performant que ceux mis en oeuvre dans le passé pour étudier cet effet. La contribution d'une composante d'électro-absorption a pu être mise en évidence.

#### 4.5 Etude des propriétés de transport par analyse EBIC à énergie variable (S. NAJAR, A. KARAR, B. EQUER)

Les électrons de la gamme d'énergie 2-30KeV constituent des sondes qui peuvent être utilisés pour analyser les propriétés de transport dans un dispositif. Dans la méthode, "EBIC" (Electron Beam Induced Current) on utilise un microscope électronique à balayage comme source d'électrons et on analyse le courant induit dans le matériau à étudier. Cette méthode offre un moyen efficace de contrôle des couches minces conductrices et des dispositifs. Dans l'étude en cours, on fait varier l'énergie des électrons de façon à modifier le profil des porteurs générés dans la couche et notamment la profondeur moyenne de ce profil. En analysant le courant induit en fonction de l'énergie des électrons, on espère pouvoir reconstruire le profil du champ électrique dans la structure et estimer les vitesses de recombinaison superficielles aux interfaces. Pour valider cette approche, une première étude a porté sur des structures p-i-n épaisses (de 1 à 4  $\mu\text{m}$ ) soumises à des polarisations variables allant jusqu'à près de 100V/ $\mu\text{m}$ . Cette technique a été mise en oeuvre sur un microscope Stereoscan 90, en tenant compte des particularités des matériaux amorphes qui présentent des effets de mémoire importants après irradiation. Les premiers résultats montrent la validité du principe. L'expérience va être poursuivie et ses résultats confrontés avec ceux d'autres méthodes.

## **5 Elaboration de dispositifs.**

Le silicium amorphe est apparu, au milieu des années 70 comme un matériau susceptible de révolutionner le domaine des photopiles solaires. Une partie importante du programme de recherche se situe encore dans cette perspective notamment celle qui touche aux alliages silicium-germanium ou encore aux interfaces avec les oxydes semi-conducteurs transparents. Plus récemment, d'autres applications des semi-conducteurs amorphes ont connu un essor considérable ; c'est le cas des afficheurs et en particulier des écrans à cristaux liquides dans lesquels le silicium est utilisé comme matériau actif permettant d'intégrer une fonction électronique sur des dispositifs de grande surface. D'autres applications, aux capteurs en particulier, sont en voie de développement et suscitent un large effort de recherche amont.

### 5.1 Photopiles solaires (diodes p-i-n). (C. GODET, P. ROCA en collaboration avec SOLEMS)

L'optimisation des diodes p-i-n en silicium amorphe hydrogéné a permis de mettre en évidence l'importance du choix du substrat ( $\text{SnO}_2$ , lisse ou rugueux) et celui d'un alliage à grande bande interdite comme Si-C pour la couche d'entrée. La combinaison d'un bon choix de ces deux paramètres a conduit à des rendements de 9%, en progrès très sensible sur les rendements précédemment obtenus sans carbone (6,6%). Les premières photopiles à base d'alliages Si-Ge ont été réalisées en 1988.

5.2 Détecteurs de rayonnements ionisants (B.EQUER, A.KARAR, P.ROCA, C.GODET en collaboration avec l'Université de Montreal)

La détection de rayonnements ionisants, particules chargées (électrons, protons, alphas...) ou de rayons X exige de grandes surfaces actives, faute de moyens simples pour réaliser des images sur des détecteurs de petite surface comme on le fait en optique. Par ailleurs, elle exige le plus souvent une excellente détectivité, allant jusqu'à la détection de la particule unique. Les semiconducteurs amorphes satisfont bien à l'exigence de grande surface, mais leurs propriétés électroniques particulières les faisait considérer comme impropres à ce type d'application. Nous avons pu réaliser en 1987 la détection de rayonnements ionisants, en mode comptage de particules, avec des structures p-i-n en silicium amorphe. Une nouvelle phase d'expérimentation, nécessaire pour élucider complètement la nature des mécanismes de collection, a fait l'objet d'une collaboration avec l'Université de Montreal et a déjà permis de confirmer la présence d'un effet "plasma" lié aux fortes densités de porteurs générées par les particules ionisantes et de préciser le comportement de cet effet en fonction de l'ionisation. Les résultats obtenus permettent d'envisager la réalisation de détecteurs à localisation de grande surface susceptibles d'être employés dans les applications industrielles et biomédicales de l'imagerie nucléaire et de l'imagerie X.

## 6 Instrumentation et Valorisation

L'existence d'une activité industrielle, en plein développement, sur les semi-conducteurs amorphes et plus généralement, l'occurrence de nombreux problèmes mettant en jeu des interfaces semiconducteurs dans l'industrie électronique entraîne un intérêt constant pour de nouvelles méthodes de traitement et surtout de caractérisation.

6.1 Développement du réacteur ARCAM. (J. HUC, C. GODET, A. LLORET, J.L. MONCEL, J.Y. PAREY)

Après deux ans de fonctionnement ininterrompu, un nouveau programme de développement du réacteur ARCAM a été entrepris. Il s'agit pour l'essentiel de rendre la machine entièrement automatique dans le but de réaliser des multicouches, Si-SiC, Si-SiN, Si-Ge, nipi, etc... comportant des interfaces abruptes. Ce programme comporte de nombreux travaux en mécanique, électronique et informatique et l'installation d'une nouvelle ligne de gaz.

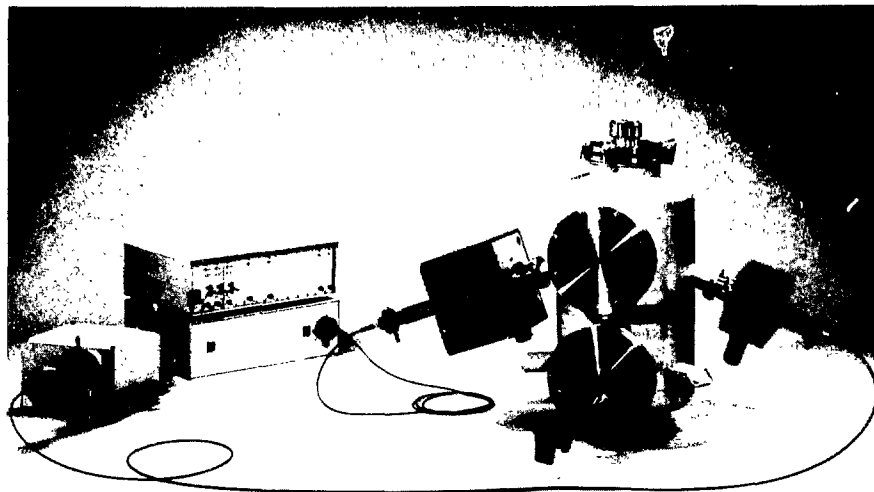
6.2 Mesure in-situ de la réflectivité différentielle spectroscopique (O. ACHER et B. DREVILLON en collaboration avec le LCR de THOMSON-CSF)

La *réflectivité différentielle spectroscopique* (RDS) est une technique très récente (1987) qui consiste à mesurer la différence de réflectivité, en incidence normale, entre les états de polarisation parallèle et perpendiculaire à un axe cristallographique principal de la surface. Cette technique s'apparente par de nombreux points à l'ellipsométrie à modulation de phase : utilisation d'un modulateur photoélastique, analyse de Fourier du signal... Fin 1988, un tel dispositif a été directement adapté (sans hublots) à un réacteur de croissance de semiconducteurs III-V par décomposition chimique en phase gazeuse de composés métallorganiques (OMCVD). Les premiers résultats obtenus sur divers composés (InAs, InP, InGaAS...) sont très encourageants en ce qui concerne la sensibilité de la méthode. La RDS apparaît déjà comme une technique prometteuse pour la description chimique et structurale, au niveau de la monocouche atomique, de la croissance cristalline.



6 3 Transfert industriel d'ellipsomètres. (B. DREVILLON, J.Y. PAREY, M. STCHAKOVSKI, B. SCHLAYEN en collaboration avec INSTRUMENTS SA)

Deux contrats de licence exclusive ont été signés avec Instruments SA (Division Jobin-Yvon). Ils concernent les deux ellipsomères à modulation de phase (UV-visible et infrarouge). Dans ce cadre, un ellipsomètre UV-visible de deuxième génération est en cours de réalisation. Au niveau optique, l'encombrement de l'appareil a été considérablement réduit par l'utilisation de fibres optiques, ce qui facilitera les utilisations in-situ. Par ailleurs le traitement numérique du signal a été entièrement modifié. En particulier, un processeur adapté à la transformée de Fourier rapide (DSP) est désormais utilisé. Un prototype de l'ellipsomètre UV-visible a été présenté au salon Mesucora (Novembre 1988). *photographie ci-dessous*



## PUBLICATIONS

## REVUES SCIENTIFIQUES

- B. Drevillon et C. Godet : In situ investigation of the microcrystalline germanium nucleation and growth processes. *J. Appl. Phys.* 64 (1988) 145.
- C. Godet et B. Drevillon : Kinetic ellipsometry study of the hydrogen plasma etching of amorphous silicon films. *J. Vac. Sci. Technol. A* 6 (1988) 2482.
- C. Longeaud, G. Fournet, R. Vanderhaghen : Determination of the density of states of the conduction band tail in hydrogenated amorphous silicon. *Phys. Rev.* B38 (1988) p 7493
- R. Vanderhaghen : Electron transport parameters and tail states distribution in hydrogenated amorphous silicon obtained from position and tail-state matrix simulation of drift experiments, *Phys. Rev.* B38 (1988) p 10755
- C. Tanguy , D. Hulin, A. Mourchid, P.M. Fauchet , S. Wagner : Free-carrier and temperature effects in amorphous silicon thin films, *Appl. Phys. Lett.* 53 (1988) p 880
- I. Chambouleyron, A. Lloret, P. Roca i Cabarrocas, J. Sardin, J. Andreu : Hydrogen content, transport properties and light degradation of a-Si:H films containing artificially generated interfaces. *Solar Energy Materials*, 17 (1988) 1.
- J. Andreu, G. Sardin, A. Lloret, J. Esteve, J. L. Morenza : Distribution of electron energy in an electrostatically confined silane plasma. *J. Appl. Phys.* 62 (1988) 1230.
- L. Abouaf-Marguin, A. Lloret, M. Oria, B. Séoudi : Direct observation, by the matrix isolation technique, of nitric oxide effects in low pressure silane discharges. *Chem. Phys.* 127 (1988) 385.
- P. Roca i Cabarrocas, B. Drevillon, L. Chahed and M.L. Theye : Light induced effects on the optical absorption of a-Si:H, *J. of Non-Cryst. solids* 104, 59 (1988).
- B. Drevillon and R. Benferhat : Infrared ellipsometry study of the vibrational properties and the growth of hydrogenated amorphous silicon ultrathin films, *J. Appl. Phys.* 63, 5088 (1988).
- A. M. Antoine and B. Drevillon : Influence of the substrate on the early stage of the growth of hydrogenated amorphous silicon evidenced by kinetic ellipsometry, *J. Appl. Phys.* 63, 360 (1988).
- R. Benferhat, B. Drevillon and P. Robin : Infrared ellipsometry study of oriented molecular monolayers, *Thin Solid Films* 156, 295 (1988).
- B. Drevillon : Spectroscopic ellipsometry of ultrathin films from UV to IR, *Thin Solid Films* 163, 157 (1988).
- B. Drevillon : L'ellipsométrie spectroscopique de l'ultraviolet à l'infrarouge, *Interactions plasmas-froids matériaux, Journées d'Etudes "Oléron 1987"*, Ed. GRECO 57 du CNRS et C. Lejeune (Les Editions de Physique, Les Ulis, France, 1988) p.3
- O. Acher, E. Bigan and B. Drevillon : Improvements of phase modulated ellipsometry, *Rev. Sci. Instr.* 60, 65 (1989).

S. Kumar and B. Drevillon : A real time ellipsometry study of the growth of amorphous silicon on transparent conducting oxides, *J. Appl. Phys.* (sous presse).

J. Perrin. Modèles cinétiques et transport de matière dans les plasmas réactifs: cas du silane, Interactions plasmas froids - matériaux, Journées d'Etudes "Oléron 1987", Ed. GRECO 57 du CNRS et C. Lejeune (Les Editions de Physique, Les Ulis, France, 1988) pp.487-519

J. Perrin, B. Allain, Quenching of excited mercury atoms ( $6^3P_1$  and  $6^3P_0$ ) in collisions with  $SiH_4$ ,  $SiD_4$ ,  $Si_2H_6$  and  $GeH_4$ , *Chem. Phys.* 123 (1988) p. 295

J. Perrin, B. Allain, P. Roca i Cabarroccas, J.M. Friedt : a-Si:H deposition from  $SiH_4$  and  $Si_2H_6$  rf-discharges: pressure and temperature dependence of film growth in relation to the  $\alpha - \gamma$  discharge transition, *Japan. J. Appl. Phys.* 27 (1988) 2041

B. Allain, J. Perrin, J.L. Guizot : Modelling of silicon nitride deposition by 254nm Hg-photosensitization and 185nm photolysis of  $SiH_4/NH_3$  gas mixture, *Appl. Surf. Science* 36 (1989) 205

J. Perrin, Y. Takeda, N. Hirano, H. Matsuura, A. Matsuda : Effect of ion bombardment on the growth and properties of hydrogenated silicon-germanium alloys, *Japan. J. Appl. Phys.* 28 (1989) 5

J. Perrin, Y. Takeda, N. Hirano, Y. Takeuchi, A. Matsuda : Sticking and recombination of the  $SiH_3$  radical on hydrogenated amorphous silicon: the catalytic effect of diborane, *Surf. Science* (1989) (à paraître)

D. Burland, D. Shattuck, J. Perrin : The thermal conductivity of elastomer composites for electrophotography, *J. Imaging Technology* (à paraître)

B.Equer : Les détecteurs à semiconducteurs : du cristal aux couches minces. *Le Journal de Physique.* (sous presse), 60 pages

Equer B., and A. Karar, Effect of primary ionization in amorphous silicon detectors, *Nuclear Inst. and Meth.*, **A 271** (1988) 574-584

Equer B., and A.Karar, Amorphous semiconductors for particle detection : Physical and technical limits and possibilities *Nucl. Instr. and Meth.*, **A 275** (1989) 558-563

#### COMMUNICATIONS A DES CONGRES

G Sardin, C. Roch, J. Andreu, J.L. Morenza, C. Godet, A. Lloret et J.P. Stoquert. Study of hydrogen incorporation in a-SiGe:H thin films by the thermal effusion technique. *Proceedings of the 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Florence, Italie, mai 1988), Ed. I. Solomon, B. Equer, P. Helm (Kluwer Academic Publishers 1988) p 776.

L. Chahed M.L. Theye, S. Basrour, J.C. Bruyere, C. Godet et A. Lloret. Gap-states studies in a-SiGe:H alloys. *Proceedings of the 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Florence, Italie, mai 1988) Ed. I. Solomon, B. Equer, P. Helm (Kluwer Academic Publishers 1988) p846.

R. Vanderhagen, C. Longeaud : Experimental determination of electron transport parameters in hydrogenated amorphous silicon germanium alloys, *Proceedings of the 8th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference* (Florence 1988) Ed. I. Solomon, B. Equer, P. Helm (Kluwer Academic Publishers 1988) p. 987

B. Drevillon, S. Kumar and P. Roca i Cabarrocas : In-situ investigation of the a-Si:H / Transparent conducting oxide interfaces combining kinetic ellipsometry and Kelvin probe measurements, *Selected topics in electronic materials*, MRS Boston Fall Meeting, dec. 1988, p.255.

J.L. Guizot, P. Alnot, J. Perrin, B. Allain, Evolution of the GaAs (001) surface physico-chemical characteristics and electrical properties of the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/GaAs interface with the NH<sub>3</sub> photolysis treatment of the GaAs surface, Proceedings of the MRS Boston Fall Meeting, dec.1988, Mat. Res. Symp. Proc. (à paraître)

B. Allain, J. Perrin, J.L. Guizot, Modelling of silicon nitride deposition by 254nm Hg-photosensitization and 185nm photolysis of SiH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> gas mixture, European MRS meeting, Strasbourg, Juin 1988

J.Dubeau, T.Pochet, B.Equer, A.Karar, L.A Hamel, J.P Martin, S.C Gujrathi, A. Yelon, Response of a-Si : H Detectors to protons and alphas, *Amorphous Silicon Technology, MRS Symposium Proceedings* Vol 118, Ed A.Madan, (1988) p 908-913

B.Equer, A.Karar, S.Najar, J.Andreu, Variable energy EBIC analysis of p-i-n devices, *Proceedings of the 8th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Florence 1988, Ed. I.Solomon, B.Equer and P.Helm, Kluwer Academic Pub.(1988)

P.Roca i Cabarrocas, A.Labdi, B.Equer, Residual doping effects using diborane. The importance of the reactor design, *Proceedings of the 8th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Florence 1988, Ed. I.Solomon, B.Equer and P.Helm, Kluwer Academic Pub.(1988) pp811-815

L.Hadjeris, G.de Rosny, B.Equer, Electroreflectance and electrostriction in a-Si : H films, *Proceedings of the 8th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Florence 1988, Ed. I.Solomon, B.Equer and P.Helm, Kluwer Academic Pub.(1988) pp 711-718

### THESES

P. ROCA i CABARROCAS : Science des matériaux et technique du réacteur dans le dépôt par procédé plasma RF de photopiles et d'autres dispositifs en silicium amorphe hydrogéné.

A. LABDI : Caractérisation des structures n<sup>+</sup> i n<sup>+</sup> minces, à base de silicium amorphe hydrogéné par la méthode des courants limités par charge d'espace : Prise en compte des effets d'interface.

# **LABORATOIRES DE RECHERCHE**

## **DIRECTION DES LABORATOIRES**

### **BIOLOGIE**

Biochimie (BIOC)

### **CHIMIE**

Chimie Fine (DCFI)

Phosphore & Métaux Transition (DCPH)

Calculs Scientifiques (DCCS)

Synthèse Organique (DCSO)

Mécanismes Réactionnels (DCMR)

### **MECANIQUE**

Mécanique des Solides (LMS)

Météorologie Dynamique (LMD)

### **PHYSIQUE**

Solides Irradiés (SESI)

Optique Appliquée (LOA)

Optique Quantique (OPTQ)

Interfaces et Couches Minces (PICM)

Matière Condensée (PMC)

Biophysique (BIOP)

Milieux Ionisés (PMI)

Physique Théorique (CPHT)

Physique Nucléaire Hautes Energies (PNHE)

Utilisation des Lasers Intenses (LULI)

### **MATHEMATIQUES**

Mathématiques (MAT)

Mathématiques Appliquées (MAP)

### **SCIENCES HUMAINES**

Econométrie (CECO)

Epistémologie (CREA)

Recherche en Gestion (CRG)

### **INFORMATIQUE**

Informatique (LIX)

**PICM** - 91128 Palaiseau Cedex  
Tél. (33)(1) 69 41 82 00 poste 2277 - Télex 601.596 F - Télécopieur 69.41.33.92