

|                                                                                                                          |                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | <b>ANR-05-PNANO-043-01</b><br><br><b>MEMOIRE</b><br><i>Mémoire à nanocristaux auto-organisés</i> |
| <b>ANNEE 2006</b><br><br><b>Rapport semestriel d'activité – S2</b><br><br>Période rapportée : 01 Juin - 30 Novembre 2006 |                                                                                                  |

**Coordinateur du Projet: I. Berbezier, L2MP - CNRS (Marseille, France)**

*Partenaires :*

**L2MP**

I. Berbezier, F. Michelini, D. Deleruyelle



**IRPHE**

A. Verga



**STM**

P. Mazoyer



# **SOMMAIRE**

|                                                                           |                |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>A. Identification</b>                                                  | <b>Page 03</b> |
| <b>B. Rappel des tâches allouées pour l'ensemble du projet</b>            | <b>Page 03</b> |
| <b>C. Description des travaux effectués</b>                               | <b>Page 04</b> |
| <b>D. Résultats obtenus</b>                                               | <b>Page 05</b> |
| <b>E. Difficultés rencontrées et solutions de remplacement envisagées</b> | <b>Page 06</b> |
| <b>F. Faits marquants et livrables externes réalisés</b>                  | <b>Page 07</b> |
| <b>G. Autres commentaires</b>                                             | <b>Page 08</b> |

## A. Identification

|                               |                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Programme – année</b>      | <b>Nanosciences, Nanotechnologies - édition 2005</b> |
| <b>Projet</b>                 | <b>MEMOIRE</b>                                       |
| <b>Coordinateur du projet</b> | <b>L2MP - CNRS</b>                                   |

|                                                                          |                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Partenaire concerné <sup>1</sup><br>(société/organisme)                  | Tâche 1 : I. Berbezier<br>Tâche 3 : F. Michelini<br>Tâche 4 : D. Deleruyelle |
| Référence convention/décision <sup>2</sup>                               | <b>ANR-05-PNANO-043-01</b>                                                   |
| Période du projet<br>(date début – date fin)                             | <b>01/12/2005 – 01/12/2008</b>                                               |
| Période faisant l'objet du rapport<br>d'activité (date début – date fin) | <b>01/06/2006– 30/11/2006</b>                                                |
| Rédacteur de ce rapport : nom                                            | <b>SZKUTNIK Pierre David</b>                                                 |
| téléphone                                                                | <b>04-91-28-91-64</b>                                                        |
| adresse électronique                                                     | <b>Pierre.szcutnik@l2mp.fr</b>                                               |
| Date                                                                     | <b>22/12/2006</b>                                                            |

## B. Rappel des tâches allouées pour l'ensemble du projet <sup>3</sup>

| Tâches                                                     | 2006 |    | 2007 |    | 2008 |    | Commentaires                  |
|------------------------------------------------------------|------|----|------|----|------|----|-------------------------------|
|                                                            | S1   | S2 | S1   | S2 | S1   | S2 |                               |
| <b>Tâche 1 : Fabrication des structures</b>                |      |    |      |    |      |    |                               |
| 1-1 : Nanostructuration                                    |      | ☒  |      |    |      |    |                               |
| 1-2 : NC sur oxyde                                         | ☒    | ☒  |      |    |      |    |                               |
| 1-3 : Auto-organisation                                    |      |    | ■    | ■  |      |    |                               |
| 1-4 : Composant                                            |      | ■  |      |    |      |    |                               |
| <b>Tâche 3 : Modélisation propriétés électroniques</b>     |      |    |      |    |      |    |                               |
| 3-1 : Prop. Electroniques NCs                              | ☒    | ☒  |      |    |      |    |                               |
| 3-2 : Transport                                            | ☒    | ☒  |      |    |      |    |                               |
| 3-3 : Prop. Electroniques surf. rugueuses                  | ☒    | ☒  |      |    |      |    |                               |
| <b>Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants</b> |      |    |      |    |      |    |                               |
| 4-1.1 Simulation des structures « Capa »                   | ☒    | ☒  |      |    |      |    |                               |
| 4-1.2 Modèles analytiques des « Capa »                     |      | ☒  |      | ☒  | ■    | ■  |                               |
| 4-1.3 Simulation des structures « Mémoires »               |      | ☒  | ☒    | ■  |      |    |                               |
| 4-1.4 Modèles analytiques des « Mémoires »                 |      | ☒  |      | ■  | ■    | ■  |                               |
| 4-2.1 Caractérisation des structures « Capa »              |      | ✘  | ■    | ▲  |      |    | réception récente du matériel |
| 4-2.2 Caractérisation des structures « Mémoires »          |      |    |      | ■  | ■    | ■  |                               |

|         |               |             |           |
|---------|---------------|-------------|-----------|
| ■ Prévu | ▲ Reprogrammé | ✘ Abandonné | ☒ Réalisé |
|---------|---------------|-------------|-----------|

<sup>1</sup> Si le partenaire n'est pas le coordinateur

<sup>2</sup> Cf. numéro mentionné au niveau de décision d'aide/convention du partenaire concerné

<sup>3</sup> Le tableau ci-dessous devra être complété par le partenaire concerné, en fonction des tâches et livrables dont il a la charge. Le coordinateur est invité à faire également, en plus du sien, le diagramme des grandes tâches pour l'ensemble du projet qu'il placera sous l'encadré qui lui est réservé.

## C. Description des travaux effectués par le partenaire pour la période concernée et conformité de l'avancement aux prévisions

### *Tâche 1 : Fabrication des structures*

Durant cette année notre tâche a été de définir et optimiser les conditions expérimentales de dépôt / démouillage / cristallisation / du Ge et du Si.

Les échantillons réalisés consistent en un film amorphe de Ge, d'épaisseur variable (entre 0.5 et 10 nm suivant les échantillons), déposé sur une couche tunnel de silice ( $\text{SiO}_2$ ) de 5 nm d'épaisseur et recuit à haute température et d'une couche d'encapsulation de Silicium amorphe. Les échantillons ont tous été observés par microscopie électronique en transmission. Les vues en coupe transverse, révèlent deux points importants : 1) les nanocristaux de plus petite taille sont parfaitement monocristallins (sans défaut étendu) et 2) ils présentent une forme qui ne dépend pas de leur taille ni des conditions de formation. Cette forme peut donc être assimilée à une forme d'équilibre. Des préparations en vue plane sont en cours afin de déterminer la densité des nanocristaux. Nous confirmerons aussi leur forme ainsi que la nature des facettes (que l'on peut déjà extrapoler à partir des premières analyses).

Par ailleurs les nanocristaux ont été étudiés par spectroscopie de champ proche et leur gap a été déterminé en fonction de leur taille. Des effets de confinement quantique ont ainsi été mis en évidence.

Nous avons initié l'exploration de la nanostructuration par instabilité de croissance en effectuant des dépôts de Ge sur des surfaces vicinales de silicium désorienté de  $8^\circ$ . Une corrugation s'établit alors sur la surface entière et présente une périodicité de quelque dizaine de nanomètres.

Enfin la fabrication de composants modèles à partir des échantillons réalisés (à base de nanocristaux distribués aléatoirement sur la surface) est en cours.

### *Tâche 3 : Propriétés électroniques des nanocristaux*

Depuis une année, nous avons mis en œuvre différentes approches du calcul des états électroniques à une et à plusieurs particules dans les nanocristaux de façon à pouvoir simuler leurs propriétés de transport dans différents régimes : conduction par électrons chauds et transport tunnel résonant, mais en pensant également à d'éventuelles applications optiques. Conformément à notre plan prévisionnel, notre principal objectif a été de mettre au point des modèles simples et de penser la future entreprise de modélisations plus réalistes à partir des investigations en TEM des couches fabriquées.

Un modèle k.p une bande incluant les ordres 3 et 4 a été proposé afin de prendre en compte les effets de non-parabolicité de la bande de conduction dans les semi-conducteurs à gap indirect (effets pouvant être importants compte tenu du fort confinement dans les objets zéro-dimensionnels). Un code de modélisation 3D d'une boîte quantique de forme parallélépipédique et de hauteur de barrières infinies est développé dans le cadre de ce modèle k.p sur le cluster Merlin. Les effets coulombiens sont pris en compte via la méthode de Hartree self consistante. Parallèlement, le traitement formel des corrélations électroniques selon une technique alternative à la configuration d'interaction est en cours d'investigation. Son principe repose sur la prise en compte de la dégénérescence d'échange seulement après la détermination des états polyélectroniques qui incluent alors les états de bosons et mixtes en plus des états fermioniques qui nous intéressent.

Nous avons développé un modèle de transport 1D qui repose sur le formalisme des fonctions de Green. Ce formalisme est très puissant puisque dans l'absolu il permet de modéliser très proprement tous les phénomènes de transport des particules quantiques. Par ailleurs, dans un premier temps, une approche unidimensionnelle permet de se faire une idée assez précise du comportement quantitatif d'une structure comme celle que nous souhaitons étudier. Nous sommes en conformité avec les prévisions.

#### ***Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants***

Les précédents résultats concernant l'étude électrostatiques de la fenêtre de programmation en fonction de la densité des nanocristaux (NCs) et des épaisseurs d'oxyde (tunnel et contrôle) ont pu être validés en ayant recours à un modèle analytique hérité des mémoires à grille flottante continue et adapté au cas des NCs. Durant cette période, nous nous sommes attachés à développer un modèle semi-analytique permettant de calculer le potentiel flottant d'un nanocristal, de forme quelconque, portant une charge  $Q_{\text{dot}}$ . La connaissance de ce potentiel est essentielle pour l'établissement de modèles de chargement/déchargement. Ce modèle a été développé en utilisant les fonctions de Green, de nombreuses simulations de type « éléments finis » ont également été réalisées sur les mêmes géométries et on permis de vérifier l'excellent accord de ces deux approches. Pour l'heure, ce modèle permet de calculer le potentiel flottant de NCs métalliques 2D. Des simulations Poisson-Schrödinger de type « éléments finis », utilisant le précédent code pour avoir une estimation du potentiel flottant, sont en cours de réalisation afin de prendre en compte la nature Si ou Ge des nanocristaux.

Suite au retard évoqué lors du précédent rapport concernant la réception de l'AFM, la nano-caractérisation des NCs n'a pas pu être amorcée durant ce semestre. Les activités suivantes ont été réalisées à la place : la simulation TCAD des structures « mémoires » a été menée du point de vue électrostatique et les simulations dynamiques (chargement/déchargement) sont en cours de réalisation (chargement par effet Fowler-Nordheim, porteurs chauds)

### **D. Résultats obtenus par le partenaire pour la période concernée**

#### ***Tâche 1 : Fabrication des structures***

Les plus petits nanocristaux issus du recuit du film amorphe de 0.5 nm d'épaisseur ont un diamètre moyen de 5 nm. Des plans cristallins (111) du Ge ont été identifiés. En augmentant l'épaisseur de film, non seulement le diamètre moyen des nanocristaux augmente de 18 à 70 nm mais la forme évolue avec l'introduction progressive de nouvelles facettes. Un paramètre ne varie pas, il s'agit du rapport entre le diamètre des nanocristaux et leur hauteur toujours égale à 0.8. Pour les nanocristaux de diamètre  $\sim 5$  nm, nous avons mesuré un gap de 1,8 eV qui est expliqué par le phénomène de confinement quantique. De plus, un effet de tunnel résonnant a été mis en évidence lors de mesure  $I(V)$  effectuées sur ces nanocristaux.

Une étude TEM similaire est entreprise sur les nanocristaux de Si, mais pose quelques problèmes de pour la visualisation des NC.

Concernant la nanostructuration de la surface par instabilité de croissance, une corrugation périodique de 40 nm a été mesuré suite au dépôt de quelque monocouches de Ge sur une surface vicinale désorienté de  $8^\circ$ .

#### ***Tâche 3 : Propriétés électroniques des nanocristaux***

Le code Poisson-Schrödinger 3D a été testé du point de vue numérique sur le cluster Merlin. Le calcul des états discrets de la boîte quantique a été validé dans le cadre de l'approximation de masse effective. Nous prévoyons maintenant de quantifier les effets de la non parabolicité.

Parallèlement, le développement formel de l'interaction Coulombienne, par la méthode alternative à la configuration d'interaction, a été mené jusqu'à la détermination de tous les états énergétiques avec la dégénérescence d'échange. Il reste à traiter les matrices de projection sur les états de symétrie donné (anti-symétrique pour les fermions).

Nous avons calculé le courant traversant la structure. Ce dernier dépend évidemment de la distribution des électrons dans le canal du transistor (état initial). Or si l'on considère des électrons chauds dans ce canal (ce qui arrive lorsque le canal est très court) on note un fort accroissement du courant tunnel. On peut en conclure que le remplissage de la boîte se fera sans doute en régime

d'électrons chauds. Dans ce cas la prise en compte de la relaxation de ces électrons avec des phonons pour le remplissage de la boîte est donc la prochaine étape.

#### ***Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants***

L'évolution de la tension de bandes plates en fonction de la densité de NCs, de l'épaisseur de l'oxyde tunnel et de l'épaisseur de l'oxyde de contrôle a pu être quantitativement expliquée grâce à un modèle électrique basé sur l'approximation capacitive de l'empilement M-O-NC-O-Si (Métal-Oxyde-Nanocrystal-Oxyde-Silicium). Néanmoins, cette approche, pertinente dans le cas de mémoires à grille flottante continue, nécessitait de plus amples développements dans le cas de NCs : est-il possible de définir une « capacité » dans le cas de nano-électrodes flottantes, telles que les NCs ? C'est la question à laquelle notre modèle semi-analytique nous a permis de répondre. Une prédiction du potentiel flottant des NCs peut être obtenue en ayant recours à un circuit électrique équivalent utilisant de simples condensateurs. Celles-ci peuvent être extraites numériquement par notre modèle et donnent une estimation excellente du potentiel flottant contrairement aux approximations usuellement faites dans la littérature.

Concernant l'étude des phénomènes de chargement/déchargement des mémoires à NCs, nous avons pu mettre en évidence que l'utilisation du phénomène de type Fowler-Nordheim seul ne permettait pas un chargement des NCs à cause du faible couplage capacitif NCs-grille de contrôle. Nous procédons actuellement à l'implémentation des phénomènes de type « porteurs chauds », censés résoudre ce problème.

### **E. Difficultés rencontrées par le partenaire et solutions de remplacement envisagées**

#### ***Tâche 1 : Fabrication des structures***

Nous avons rencontré un problème de préparation des échantillons pour la microscopie TEM, en effet la couche d'oxyde de silicium n'était plus présente à la fin de la préparation des échantillons avec des NCs de Si. Au cours du premier semestre 2007 de nouveaux échantillons de NCs de Si seront élaborés.

L'achat du FIB (ions Si) a été retardé et devrait voir le jour courant 2007. Des solutions de remplacement pour le premier semestre 2007 ont été trouvées.

#### ***Tâche 3 : Propriétés électroniques des nanocristaux***

Au premier semestre de l'année 2006, nous avons résolu les problèmes numériques liés à l'existence de solutions spéicieuses dans les méthodes k.p couvrant la bande interdite. Cependant, la solution envisagée s'avère assez lourde numériquement. C'est pourquoi, nous avons commencé à implémenter une nouvelle approche radicalement différente qui semblerait s'annoncer plus performante.

Une difficulté sous-estimée est la prise en compte de la charge dans les boîtes qui influe sur les caractéristiques électroniques et donc celles de transport. Or cette prise en compte est extrêmement lourde d'un point de vue numérique. Mais en régime d'électrons chauds les caractéristiques intrinsèques de la boîte n'ont pas un impact fondamental sur le transport. Son environnement, à savoir l'oxyde et la distribution des électrons dans le canal, semble plus important. La gestion dans le modèle de la charge ne semble donc pas déterminante.

#### Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants

Suite aux précédentes remarques concernant la recherche d'un complément financier pour l'achat de l'AFM et de son module « tunnel », le laboratoire a pu rassembler la somme nécessaire et procéder à l'achat durant le mois d'octobre 2006. Le matériel a été livré au laboratoire début décembre et son installation sera mise en œuvre mi-décembre. Sous réserve d'installation, les mesures électriques sur « capacités » pourront donc débuter courant janvier 2007.

Comme annoncé dans le précédent rapport, la partie du projet dédiée à la simulation des dispositifs « mémoires » a été amorcée durant S2 2006 au lieu de S1 2007.

### F. Faits marquants et, le moment venu, livrables externes réalisés

Un fait marquant en 2006 a été l'organisation, par le coordinateur du projet, d'une conférence internationale intitulée « NANOstructures Self-Assembly » NANO SEA 2006 qui s'est déroulée du 2 au 6 juillet 2006 au centre des congrès d'Aix en Provence. La conférence a attiré presque 200 personnes de 31 Pays différents.

Deux réunions ont été organisées entre les partenaires courant 2006 : 1) 03 Mars 2006 et 2) 14 Décembre 2006. Elles ont permis aux différents partenaires de présenter leurs résultats et de corréliser leurs recherches. Un site web a été créé sur lequel les présentations sont consultables <http://www.l2mp.fr/projets/PNANO.html>

Il est prévu de se réunir tous les trois mois durant les deux prochaines années.

Toutes les échéances prévues ont été tenues dans les trois tâches du coordinateur : 1) fabrication des structures ; 2) Propriétés électroniques des nanocristaux ; 3) Caractérisation électrique des composants.

Quelques papiers ont été publiés sur le sujet. La liste non exhaustive est donnée ci-dessous.

Différentes conférences internationales sur le sujet ont été présentées.

#### Tâche 1 : Fabrication des structures

##### Conférences Internationales

1. Workshop on Silicon Optoelectronics, Grasmere, U.K., Avril 2006, **sur invitation**  
TWO-DIMENSIONAL ARRAYS OF ORDERED, HIGHLY DENSE AND ULTRA SMALL GE NANOCRYSTALS ON THIN SiO<sub>2</sub> LAYERS

I. Berbezier, A. Karmous, A. Ronda

2. ESPS-NIS, Nottingham, U.K., Avril 2006,  
FORMATION AND ORDERING OF GE NANODROPLETS ON SI AND SiO<sub>2</sub> SUBSTRATES USING FIB NANOLITHOGRAPHY

I. Berbezier, A. Karmous, P.D. Szkutnik, A. Ronda

3. EMRS 2006, Symposium T, Nice, Mai 2006, **sur invitation**

FORMATION AND ORDERING OF GE NANODOTS ON SiO<sub>2</sub>

I. Berbezier, A. Karmous, P. D. Szkutnik, A. Ronda, A. Sgarlata, A. Balzarotti, P. Castrucci, M. Scarselli and M. De Crescenzi;

4. NANOSEA 2006, Aix en Provence, Juillet 2006

GROWTH OF ULTRAHIGH-DENSITY QUANTUM-CONFINED GERMANIUM DOTS ON SiO<sub>2</sub> THIN FILMS

I. Berbezier, A.Karmous, A. Ronda, A. Sgarlata, A. Balzarotti, P. Castrucci, M. Scarselli, M. De Crescenzi

5. NANOSEA 2006, Aix en Provence, Juillet 2006

ORDERING OF GE NANOCRYSTALS USING FIB NANOLITHOGRAPHY

A.Karmous, I. Berbezier, A. Ronda, S. Atha, R. Hull

6. NANOSEA 2006, Aix en Provence, Juillet 2006

INFLUENCE OF PATTERNING ON THE NUCLEATION OF GE ISLANDS IN SI AND SiO<sub>2</sub> SURFACES

P. D. Szkutnik, A. Sgarlata, E. Placidi, N. Motta, I. Berbezier and A. Balzarotti

7. JMC 10, Toulouse, Août 2006, **sur invitation**

Auto-assemblage de nanocristaux de Ge sur substrat silicium et application aux mémoires

I. Berbezier, A. Karmous, A. Ronda

8. NANOPHEN, Bulgarie, Sept. 2006, sur invitation  
SI AND SIGE GROWTH INSTABILITIES

I. Berbezier, A. Ronda

#### Articles dans des revues à comité de lecture

1. *Formation and ordering of Ge nanocrystals on SiO<sub>2</sub>*

A. Karmous, I. Berbezier, A. Ronda, Phys. Rev. B 73 (2006) 075323

2. *Towards nanomemories: Ge growth on naturally and artificially nanostructured Si surfaces*

A. Sgarlata, A. Balzarotti, I. Berbezier, P.D. Szkutnik, F. Rosei, N. Motta, Proceedings ICONN2006

3. *Light scattering Spectroscopies of Semiconductor Nanocrystals (Quantum Dots)*

P.Y. Yu, G. Gardner, S. Nozaki, I. Berbezier, J. Of Physics: Conference Series 28 (2006) 1

4. *Kinetic modeling of Si growth instabilities*

A. Pascale, I. Berbezier, A. Ronda, A. Videoq, A. Pimpinelli, APL (2006)

5. *Early stage of Ge growth on Si(001) vicinal surfaces with an 8° miscut along [110]*

P.D. Szkutnik, A. Sgarlata, A. Balzarotti, N. Motta, A. Ronda, I. Berbezier, Phys. Rev. B, Brief Report (2006)

6. *Growth of ultrahigh-density quantum-confined germanium dots on SiO<sub>2</sub> thin films*

I. Berbezier, A. Karmous, A. Ronda, A. Sgarlata, A. Balzarotti, M. De Crescenzi, APL 89 (2006)

7. *Ordering of Ge dots on self-patterned Si substrate*

I. Berbezier, A. Ronda, Phys. Rev. B, accepté

8. *Formation and ordering of Ge nanocrystals on SiO<sub>2</sub> using FIB nanolithography*

I. Berbezier, A. Karmous, P. D. Szkutnik, A. Ronda, A. Sgarlata, A. Balzarotti, P. Castrucci, M. Scarselli and M. De Crescenzi; Material Science and Semiconductor Processing 9 (2006) 812.

9. *Early stage of Ge growth on Si(001) vicinal surfaces with an 8° miscut along [110]*

P. D. Szkutnik, A. Sgarlata, A. Balzarotti, N. Motta, A. Ronda and I. Berbezier; Physical Review B (2006), accepté.

10. *Influence of patterning on the nucleation of Ge islands in Si and SiO<sub>2</sub> surfaces*

P. D. Szkutnik, A. Sgarlata, E. Placidi, N. Motta, I. Berbezier and A. Balzarotti ; à paraître dans Surface Science 2006.

#### **Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants**

Les travaux concernant le modèle semi-analytique ont été soumis courant septembre 2006 à *Solid State Electronics* sous le titre « *On the electrostatic behavior of floating nanoconductors* » (*En attente de réponse de l'éditeur*)

#### **G. Autres commentaires.**

#### **Le cas échéant, modalités d'utilisation du complément de financement « pôles de compétitivité »**

##### **Tâche 1 : Fabrication des structures**

La partie de ce complément financier a été mis à profit pour établir une convention annuelle d'utilisation des microscopes TEM sur l'Université Paul Cézanne. Cette convention devrait aussi permettre la nanostructuration par FIB pour le premier semestre 2007.

##### **Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants**

La partie du complément financier « pôles de compétitivité » attribuée à notre équipe a été mise à profit pour l'achat de l'AFM.

**PARTIE RESERVÉE AU COORDINATEUR**

Les structures ont été réalisées en temps. Différentes caractérisations physiques (morphologiques, structurales, optiques et électriques) de ces structures sont en cours. Les premiers résultats sont très prometteurs. Les premières capacités ont été fabriquées et montrent un effet de blocage de Coulomb dans les îlots les plus petits.

Les instabilités de croissance ont été modélisées. Il a été montré que le coarsening est fortement influencé par l'anisotropie intrinsèque à toute surface vicinale. Par ailleurs, en utilisant des méthodes analytiques, nous avons défini les équations qui régissent l'évolution non linéaire d'un film contraint déposé sur un substrat rugueux ; ces équations tridimensionnelles tiennent compte de l'effet de la couche de mouillage et de la différence des propriétés élastiques du substrat et du film.

Un code numérique de simulation de calcul des états discrets de la boîte quantique a été validé dans le cadre de l'approximation de masse effective. Le développement formel de l'interaction Coulombienne, a été mené en parallèle jusqu'à la détermination de tous les états énergétiques avec la dégénérescence d'échange. Le courant traversant la structure a été calculé. Il a été montré que le remplissage de la boîte se fera sans doute en régime d'électrons chauds. Il faudra donc prendre en compte la relaxation de ces électrons avec des phonons pour le remplissage de la boîte.

Nous avons aussi déterminé l'évolution de la tension de bandes plates en fonction de la densité de NCs, de l'épaisseur de l'oxyde tunnel et de l'épaisseur de l'oxyde de contrôle. Une prédiction du potentiel flottant des NCs a été obtenue en utilisant un circuit électrique équivalent avec de simples condensateurs. Concernant l'étude des phénomènes de chargement/déchargement des mémoires à NCs, nous avons pu mettre en évidence que l'utilisation du phénomène de type Fowler-Nordheim seul ne permettait pas un chargement des NCs à cause du faible couplage capacitif NCs-grille de contrôle.

**Diagramme de Gantt pour l'ensemble du projet**

| Tâches                                                     | 2006 |    | 2007 |    | 2008 |    | Commentaires                                       |
|------------------------------------------------------------|------|----|------|----|------|----|----------------------------------------------------|
|                                                            | S1   | S2 | S1   | S2 | S1   | S2 |                                                    |
| Accord de consortium                                       |      | ■  |      |    |      |    |                                                    |
| <b>Tâche 1 : Fabrication grille flottante</b>              |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 1-1 : Nanostructuration                                    |      | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| 1-2 : NC sur oxyde                                         | ⌘    | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| 1-3 : Auto-organisation                                    |      |    | ■    |    |      |    |                                                    |
| 1-4 : Composant                                            |      | ■  |      |    |      |    |                                                    |
| <b>Tâche 2 : Modélisation auto-organisation</b>            |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 2-1 : Homoépitaxie                                         |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 2-2 : Hétéroépitaxie                                       |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 2-3 : Rugosité                                             |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| <b>Tâche 3 : Modélisation propriétés électroniques</b>     |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 3-1 : Prop. Electroniques NCs                              | ⌘    | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| 3-2 : Transport                                            | ⌘    | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| 3-3 : Prop. Electroniques surf. rugueuses                  | ⌘    | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| <b>Tâche 4 : Caractérisation électrique des composants</b> |      |    |      |    |      |    |                                                    |
| 4-1.1 Simulation des structures « Capa »                   | ⌘    | ⌘  |      |    |      |    |                                                    |
| 4-1.2 Modèles analytiques des « Capa »                     |      | ⌘  |      | ⌘  | ■    | ■  |                                                    |
| 4-1.3 Simulation des structures « Mémoires »               |      | ⌘  | ⌘    | ■  |      |    |                                                    |
| 4-1.4 Modèles analytiques des « Mémoires »                 |      | ⌘  |      | ■  | ■    | ■  |                                                    |
| 4-2.1 Caractérisation des structures « Capa »              |      | ✘  | ■    | ▲  |      |    | Décalé pour cause de réception récente du matériel |
| 4-2.2 Caractérisation des structures « Mémoires »          |      |    |      | ■  | ■    | ■  |                                                    |


|         |               |             |           |
|---------|---------------|-------------|-----------|
| ■ Prévu | ▲ Reprogrammé | ✘ Abandonné | ⌘ Réalisé |
|---------|---------------|-------------|-----------|

**Bilan des réunions de consortium tenues sur la période /date des prochaines réunions**

| TENUES <sup>4</sup>                                                                                                                                                                                                                                                       | PROGRAMMEES                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- 03 mars 2006 au laboratoire IRPHE (Marseille), première réunion : réunion de démarrage du projet ANR.</li> <li>- 14 décembre 2006 au laboratoire L2MP (Marseille), seconde réunion : état d'avancement du projet ANR.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- début février 2006 à Marseille, première réunion des entrevues trimestrielle dorénavant programmée afin d'augmenter l'interaction avec les différents partenaires</li> </ul> |

<sup>4</sup> Fournir les comptes rendus en annexe

**Éléments de communication pour le WEB <sup>5</sup> :**

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Réalisation d'une page WEB dédié au projet Mémoire - ANR-05-PNANO-043-01- Voir adresse ci-dessous.</p> <p>Organisation d'une conférence internationale intitulée NANO SEA 2006 qui s'est déroulée du 2 au 6 juillet 2006 au centre des congrès d'Aix-en-provence.</p> | <p>Illustration</p>  |
| <p><a href="http://www.l2mp.fr/projets/PNANO.html">http://www.l2mp.fr/projets/PNANO.html</a><br/><a href="http://www.l2mp.fr/nanosea/index.html">http://www.l2mp.fr/nanosea/index.html</a></p>                                                                           |                                                                                                         |

<sup>5</sup> Facultatif : vous pouvez nous transmettre un petit texte illustré d'une (et une seule) image + l'éventuelle adresse de rebond sur un site donnant plus d'information

|                                                                                                                                 |                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                | <p><b>ANR-05-PNANO-043-01</b></p> <p><b>MEMOIRE</b></p> <p><i>Mémoire à nanocristaux auto-organisés</i></p> |
| <p><b>ANNEE 2006</b></p> <p><b>Rapport semestriel d'activité – S2</b></p> <p>Période rapportée : 01 Juin - 30 Novembre 2006</p> |                                                                                                             |

**Coordinator du Projet: I. Berbezier, L2MP - CNRS (Marseille, France)**

*Partenaires :*

**L2PM** I. Berbezier, F. Michelini, D. Deleruyelle



**IRPHE** A. Verga



**STM** P. Mazoyer



# **SOMMAIRE**

**A. Identification**

**B. Rappel des tâches allouées pour l'ensemble du projet**

**C. Description des travaux effectués**

**D. Résultats obtenus**

**E. Difficultés rencontrées et solutions de remplacement envisagées**

**F. Faits marquants et livrables externes réalisés**

**G. Autres commentaires**

## A. Identification

|                               |                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Programme – année</b>      | <b>Nanosciences, Nanotechnologies - édition 2005</b> |
| <b>Projet</b>                 | <b>MEMOIRE</b>                                       |
| <b>Coordinateur du projet</b> | <b>L2MP - CNRS</b>                                   |

|                                                                          |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Partenaire concerné <sup>1</sup><br>(société/organisme)                  | <u>Tâche 2</u> : A. Verga                                                            |
| Référence convention/décision <sup>2</sup>                               | <b>ANR-05-NANO-043-01</b>                                                            |
| Période du projet<br>(date début – date fin)                             | <b>01/12/2005 – 01/12/2008</b>                                                       |
| Période faisant l'objet du rapport<br>d'activité (date début – date fin) | <b>01/06/2006– 30/11/2006</b>                                                        |
| Rédacteur de ce rapport : nom                                            | <b>A. Verga</b>                                                                      |
| téléphone                                                                | <b>33 (0) 4 9613 9751</b>                                                            |
| adresse électronique                                                     | <a href="mailto:Alberto.Verga@irphe.univ-mrs.fr">Alberto.Verga@irphe.univ-mrs.fr</a> |
| Date                                                                     | <b>21/12/2006</b>                                                                    |

## B. Rappel des tâches allouées pour l'ensemble du projet <sup>3</sup>

| Tâches 2.-<br><b>Modélisation de l'auto-organisation et<br/>de la dynamique des nanostructures</b>    | 2006 |    | 2007 |    | 2008 |    | Commentaires |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----|------|----|------|----|--------------|
|                                                                                                       | S1   | S2 | S1   | S2 | S1   | S2 |              |
| 2-1 : Homoépitaxie du Si : Dynamique de marches                                                       | x    | x  | x    |    |      |    |              |
| 2-2 : Hétéroépitaxie SiGe : Élasticité hors équilibre                                                 | x    | x  | x    | x  | x    | x  |              |
| 2-3 : Rugosité à l'échelle nanométrique : Transition<br>rugueuse cinétique sur des surfaces vicinales |      | x  |      | x  |      | x  |              |

<sup>1</sup> Si le partenaire n'est pas le coordinateur

<sup>2</sup> Cf. numéro mentionné au niveau de décision d'aide/convention du partenaire concerné

<sup>3</sup> Le tableau ci-dessous devra être complété par le partenaire concerné, en fonction des tâches et livrables dont il a la charge. Le coordinateur est invité à faire également, en plus du sien, le diagramme des grandes tâches pour l'ensemble du projet qu'il placera sous l'encadré qui lui est réservé.

## **C. Description des travaux effectués par le partenaire pour la période concernée et conformité de l'avancement aux prévisions**

2.1 (Homoépitaxie) Identification du couplage des instabilités de mise en paquet et de méandrage des marches ; origine cinétique des instabilités ; rôle de l'anisotropie de diffusion ; nature tridimensionnelle de l'évolution de la surface. Comparaison des résultats théoriques et de la modélisation numérique avec les mesures expérimentales.

2.2 (Hétéroépitaxie) Étude de l'élasticité d'un film solide sous contrainte, influence du substrat et de l'épaisseur du dépôt ; rôle de la couche de mouillage.

2.3 (Rugosité) Étude de la rugosité d'une surface singulière sous contrainte élastique en présence d'un flux de matière.

## **D. Résultats obtenus par le partenaire pour la période concernée**

2.1 « Instabilité transverse des marches, couplage avec l'instabilité de bunching » : tâche terminée (T. Frisch & A. Verga, Phys. Rev. Lett., 2005 & 2006).

On montre que le coarsening est fortement influencé par l'anisotropie intrinsèque à toute surface vicinale. En effet elle est à l'origine des lois d'évolution différenciées selon la direction parallèle ou perpendiculaire aux marches. (Frisch & Verga, Physica D, 2006, et travail en préparation avec I. Berbézier et A. Ronda). La mise en évidence expérimentale de cet effet est en cours.

2.2 On établit, en utilisant des méthodes analytiques, les équations qui régissent l'évolution non linéaire d'un film contraint déposé sur un substrat rugueux ; ces équations tridimensionnelles tiennent compte de l'effet de la couche de mouillage et de la différence des propriétés élastiques du substrat et du film. Les singularités observées par d'autres auteurs sont supprimées par un mécanisme subtil faisant intervenir le mouillage et la non linéarité. La résolution numérique de ces équations montre l'instabilité morphologique suivie par la formation spontanée d'îlots dont la taille grandit avec le temps. (Rédaction en cours d'un article, Aqua, Frisch & Verga.)

2.3 La transition rugueuse cinétique dépend, dans le cas d'une surface singulière en croissance, de l'énergie nécessaire à la création et à la nucléation des marches. On propose un modèle macroscopique qui inclut l'instabilité morphologique et tient compte de la nature stochastique du flux. (Ce travail nécessite des moyens de calcul conséquents, en particulier du cluster IRPHE-L2MP.)

## **E. Difficultés rencontrées par le partenaire et solutions de remplacement envisagées**

Aucune.

## F. Faits marquants et, le moment venu, livrables externes réalisés

Recrutement d'un post-doctorant, M. Madhav RANGANATHAN pour réaliser un travail sur la modélisation numérique de la croissance hétéroépitaxiale ; modèle de Monte Carlo cinétique avec prise en compte du champ de déformation et des contraintes élastiques.

### Articles :

- M. Duffay, J. M. Debierre and T. Frisch, Electromigration-Induced Step Meandering on a Vicinal Surfaces: Nonlinear evolution equation, sous presse, Phys. Review B, (2007).
- T. Frisch, and A. Verga, Nonlinear evolution of the step meandering instability during surface growth, sous presse, Physica D, (2007).
- T. Frisch and A. Verga, [Effect of Step Stiffness and Diffusion Anisotropy on the Meandering of a Growing Vicinal Surface](#) Phys. Rev. Lett. **96**, 166104 (2006).
- T. Frisch and A. Verga, [Kinetic Step Bunching Instability during Surface Growth](#) Phys. Rev. Lett. **94**, 226102 (2005)

### Conférences internationales :

- T. Frisch. Nonlinear description of the Bales-Zangwill Instability in the limit of a weak Schwoebel Barrier, *Instability at Surfaces*, Sunny Beach, Bulgarie, Septembre 2006.
- A. Verga. Instability and Dynamics of Step Flow, *Instability at Surfaces*, (S. Stoyanov org.) Burgas, Bulgarie, Septembre 2006. <http://www.ipc.bas.bg/Nanophen/Virt/1stmeeting.htm>
- T. Frisch. Instabilities on Si (001) during MBE growth, NanoSea 2006, Aix en Provence, France, Juillet 2006.
- T. Frisch. Instability and growth on vicinal surfaces: applications to Si 001, *Physics and Mathematics of Growing Interfaces*, Santa Fe, Etats-Unis, Janvier 2006.  
(<http://cnls.lanl.gov/Conferences/growinginterfaces/index.html>)

## G. Autres commentaires.

---

### Aspects non scientifiques

#### Le cas échéant, liste des CDD recrutés par le partenaire dans le cadre du projet <sup>4</sup>

| Nom         | Prénom | Qualifications | Date de recrutement | Durée du contrat (en mois) |
|-------------|--------|----------------|---------------------|----------------------------|
| RANGANATHAN | Madhav | CR-CNRS (PhD)  | 01-oct-2006         | 12                         |

#### Le cas échéant, modalités d'utilisation du complément de financement « pôles de compétitivité »

Préparation en cours d'une conférence intitulée « NanoSteps », à Cargèse en juin 2008 sur le thème « Self-organized nanostructures on crystal surfaces ». Le comité scientifique est formé par : T. Frisch, A. Verga, C. Misbah, O. Pierre-Louis, I. Berbézier, P. Muller, J. Krug, Y. Saito, J. D. Weeks, S. Rousset, E. D. Williams, P. Voorhees, A. Ponchet, D. Bensahel.

---

<sup>4</sup> Ne concerne que les partenaires publics

**PARTIE RESERVÉE AU COORDINATEUR**

Commentaire général sur l'état d'avancement du projet, les interactions entre les différents partenaires...

**Diagramme de Gantt pour l'ensemble du projet**

| Tâches                                                             | 2006 |    | 2007 |    | 2008 |    | Commentaires |
|--------------------------------------------------------------------|------|----|------|----|------|----|--------------|
|                                                                    | S1   | S2 | S1   | S2 | S1   | S2 |              |
| Accord de consortium                                               |      | ■  |      |    |      |    |              |
| <b>Tâche 1</b><br><b>Fabrication grille flottante</b>              |      |    |      |    |      |    |              |
| 1-1 : Nanostructuration                                            |      |    |      |    |      |    |              |
| 1-2 : NC sur oxyde                                                 |      |    |      |    |      |    |              |
| 1-3 : Auto-organisation                                            |      |    |      |    |      |    |              |
| 1-4 : Composant                                                    |      |    |      |    |      |    |              |
| <b>Tâche 2</b><br><b>Modélisation auto-organisation</b>            |      |    |      |    |      |    |              |
| 2-1 : Homoépitaxie                                                 |      |    | ■    |    |      |    |              |
| 2-2 : Hétéroépitaxie                                               |      |    | ■    |    |      |    |              |
| 2-3 : Rugosité                                                     |      |    | ■    |    |      |    |              |
| <b>Tâche 3</b><br><b>Modélisation propriétés électroniques</b>     |      |    |      |    |      |    |              |
| 3-1 : Prop. Electroniques NCs                                      |      |    |      |    |      |    |              |
| 3-2 : Transport                                                    |      |    |      |    |      |    |              |
| 3-3 : Prop. Electroniques surf. rugueuses                          |      |    |      |    |      |    |              |
| <b>Tâche 4</b><br><b>Caractérisation électrique des composants</b> |      |    |      |    |      |    |              |
| 4-1 : Simulation composants                                        |      |    |      |    |      |    |              |
| 4-2 : Caractérisation composants                                   |      |    |      |    |      |    |              |

|         |               |             |           |
|---------|---------------|-------------|-----------|
| ■ Prévu | ▲ Reprogrammé | ✘ Abandonné | ☑ Réalisé |
|---------|---------------|-------------|-----------|

**Bilan des réunions de consortium tenues sur la période /date des prochaines réunions**

| TENUES <sup>5</sup>                            | PROGRAMMEES                                    |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| - date/lieu/objet<br>- date/lieu/objet<br>.... | - date/lieu/objet<br>- date/lieu/objet<br>.... |

**Éléments de communication pour le WEB<sup>6</sup> :**

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| <Texte>         | Illustration |
| <URL de rebond> |              |

---

<sup>5</sup> Fournir les comptes rendus en annexe

<sup>6</sup> Facultatif : vous pouvez nous transmettre un petit texte illustré d'une (et une seule) image + l'éventuelle adresse de rebond sur un site donnant plus d'information

## **Projet MEMOIRE**

### **Etat de l'art**

L'intérêt des nano-cristaux pour les applications Industrielles actuelles est tourné vers le remplacement de l'architecture mémoire non volatile "à grille flottante" ou FG pour Floating Gate. Les mémoires non volatiles de fortes densités sont appelées à envahir tous les systèmes. L'objectif principal est de stocker à la fois des grandes quantités de data comme du son de l'image mais aussi du logiciel. L'industrie est à la recherche de solutions de stockage miniatures de capacité identique à celle d'un disque dur qui aujourd'hui représente plusieurs Gigabit mais surtout peu gourmandes en énergie pour allonger l'autonomie des systèmes mobiles.

La mémoire non volatile FG qui existe depuis 1967 répond bien à cette fonction. Mais depuis le nœud technologique 90nm, il devient difficile de réduire les dimensions de cette cellule car les opérations élémentaires telle que l'écriture et l'effacement nécessite des épaisseurs d'oxyde conséquentes.

L'industrie entrevoit une évolution de l'architecture conventionnelle non volatile aux alentours des nœuds 45nm ou 32nm qui semblent être les limites à l'intégration de la traditionnelle FG.

L'intérêt des nano cristaux dans l'architecture mémoire non volatile est qu'ils permettent à la fois la réduction des dimensions de la cellule et la diminution des tensions d'alimentation.

Un autre intérêt des nano dots dans la cellule mémoire est qu'ils promettent une meilleure fiabilité. La charge est stockée de façon discrète. Si un point est défaillant, les autres dots, indépendants, jouent leur rôle de réservoir de charge. L'effet mémoire est conservé.

Les détracteurs des nano dots prédisent un court avenir à cette technologie car ils n'entrevoient pas la maîtrise et la réduction de la dimension des dots. En effet, l'enjeu majeur pour que cette technologie aboutisse est de démontrer à la fois la maîtrise de la densité et de la taille des dots.

D'autres détracteurs expliquent que la charge stockée dans un nano dot devient infime des lors l'influence de cette charge sera si faible qu'elle sera difficilement détectable.

### **Travaux en cours**

Nous continuons à observer les évolutions de l'architecture FG et à suivre l'intérêt de nos concurrents pour les nano dots.

Actuellement Freescale et Fujitsu sont les plus actifs. Fujitsu se distingue en proposant des nano dots de HfO<sub>2</sub>.

### **Objectif pour la suite du projet**

Vérifier l'intérêt de l'architecture mémoire a nano dot et envisager d'autres applications que la mémoire non volatile.