

Auto-organisation de nanostructures Silicium-Germanium : une croissance sous contrainte

Les méandres d'une rivière ou les dunes de sable sont des structures auto-organisées couramment observées aux échelles géologiques. Grâce aux technologies actuelles, les échelles nanométriques des surfaces cristallines révèlent des morphologies étrangement ressemblantes. Dans une revue récente, un chercheur de l'équipe « Physico-chimie et dynamique des surfaces » de l'INSP¹ dresse un état de l'art à la fois théorique et expérimental de la croissance et de l'auto-organisation de nanostructures Silicium-Germanium sous contrainte élastique [1].

Les nanostructures semi-conductrices comme les boîtes, fils ou puits quantiques sont des objets désormais communs en nanosciences. Caractérisées par au moins une dimension plus petite que la longueur d'onde des porteurs de charge, elles permettent d'étudier et d'utiliser les effets quantiques. La contrainte élastique, générée lors de l'épitaxie de deux matériaux d'un film sur substrat avec un paramètre de maille différent, joue un rôle crucial pour ces objets : elle permet à la fois d'obtenir la croissance de certaines structures de taille nanométrique et de moduler leurs propriétés physiques. Dans ce cadre, le système paradigmatique Silicium-Germanium a fait l'objet de nombreux travaux motivés, entre autres, par la relative simplicité de sa croissance. Ainsi, les mécanismes de l'auto-organisation couplés à la longue portée des interactions élastiques permettent d'envisager un ordre à grande échelle résultant de processus hors-équilibre aux échelles nanométriques.

Si cette croissance est désormais sommairement maîtrisée et comprise, son contrôle soulève de nombreuses questions fondamentales. Quelle est l'influence de la dynamique sur les morphologies obtenues ? Quels paramètres contrôlent l'obtention d'objets homogènes en taille et spatialement ordonnés ? Quelle(s) compétition(s) existe(nt) entre l'ordre découlant d'une instabilité ou d'un forçage et le désordre inhérent à la croissance ? Quelle origine peut-on attribuer à l'absence de mûrissement d'Ostwald ou à son anomalie ? Quel couplage relie la contrainte, la composition et la croissance ?

¹ En collaboration avec le groupe d'Isabelle Berbezier à l'IM2NP de Marseille

Pour y répondre, cette revue se focalise premièrement sur les boîtes quantiques SiGe telles que les huttes, pyramides, dômes, super-dômes... (Figure 1). Elle présente leurs modes de croissance (transition 2d-3d, instabilité morphologique) et caractéristiques (morphologies, déformation, composition, mûrissement) déduits d'expériences de microscopies électronique ou à sonde locale, de diffraction de rayons X, de sonde tomographique, ou de spectroscopie.

Dans un second temps, différentes analyses des états d'équilibre et hors-équilibre sont décrites : calculs énergétiques (ab-initio, champ-moyen...), simulations numériques (Monte-Carlo notamment cinétique, champ de phase, modèle de facettes), approches cinétiques (diffusion atomique, barrières de nucléation) et dynamiques (équations d'évolution, équations de diffusion). En particulier, sont mis en exergue les résultats d'une analyse non-linéaire de l'instabilité d'Asaro-Tiller-Grinfeld incluant l'élasticité, l'anisotropie cristalline et le mouillage entre solides, qui rend compte de plusieurs faits expérimentaux [1,2] (Figure 2).

Nous analysons ensuite l'auto-organisation par croissance sur un substrat structuré par lithographie conventionnelle, faisceau d'ions, instabilité de croissance, inhomogénéité de contrainte ou d'impuretés (Figure 3).

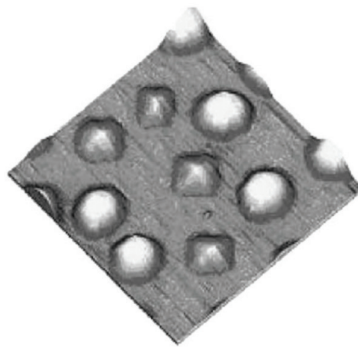


Figure 1
Image AFM de la coexistence pyramides/dômes SiGe [1].

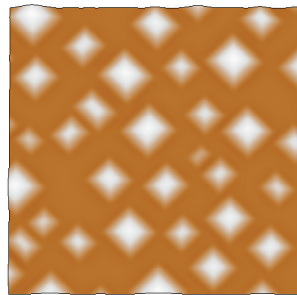


Figure 2
Morphologie obtenue dans un modèle non-linéaire continu dédié au système SiGe [2].

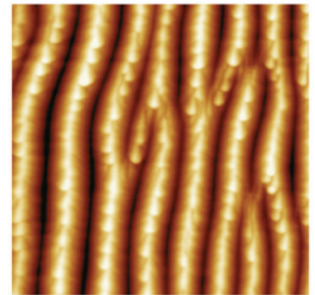


Figure 3
Auto-organisation de pyramides sur une instabilité morphologique [1].

Puis elle conclut sur l'application de cette croissance sous contrainte élastique pour l'obtention de structures plus « exotiques » comme les nano-fils, membranes, anneaux, forêts, serpents...

Les effets élastiques omniprésents en croissance cristalline révèlent donc aujourd'hui encore la richesse des questions correspondantes. Si leurs compréhension et contrôle ont sensiblement progressé, l'exploration des mécanismes de croissance jusqu'aux échelles nanométriques suscite de nouvelles problématiques tant fondamentales qu'appliquées sur lesquelles s'achève cette revue.

Références

[1] "Growth and self-organization of SiGe nanostructures"

J.-N. Aqua, I. Berbezier, L. Favre, T. Frisch, A. Ronda
Physics Reports, Vol. 522 (2013), p. 59-189

[2] "Interrupted self-organization of SiGe pyramids"

J.-N. Aqua, A. Gouyé, A. Ronda, T. Frisch, I. Berbezier
Physical Review Letters, Vol. 110, 096101 (2013)

Contact

aqua@insp.jussieu.fr