

Le « Stockage de l'Information Numérique » ou comment aborder la physique par l'application

S. Blayac¹, S. Sanaur¹, J. Kools², P. Boivin³

¹Ecole de Mines de Saint Etienne

Centre Microélectronique de Provence – 880 avenue de Mimet -13541 Gardanne - blayac@emse.fr

²Encapsulix SAS - Gardanne

³ST Microelectronics - Site de Rousset

Le cours présenté ici se propose d'aborder la physique sous un angle applicatif à travers la thématique du « Stockage de l'Information Numérique ». Les phénomènes fondamentaux y sont reliés à une problématique plus générale qui permet de les aborder « autrement ».

1. Enseigner la physique par l'application

Ce cours de 15h est développé dans le cadre des enseignements de physique de première année du cycle Ingénieurs Civils des Mines de l'école des mines de Saint Etienne. Il fait partie d'un ensemble de cours électifs aux thématiques extrêmement variées et s'inscrit dans la continuité d'un cours de base en physique du solide. Le « Stockage de l'Information Numérique » a été choisi comme fil conducteur de cet enseignement.

Plusieurs objectifs ont orienté la création de ce cours :

- Illustrer de façon très concrète les phénomènes fondamentaux étudiés en cours, dont les applications peuvent parfois sembler lointaines pour les étudiants et leur proposer une vision « démystifiée » de la haute technologie.
- Montrer que dans un monde de plus en plus « virtualisé » les problématiques matérielles restent essentielles et que leur maîtrise est stratégique.
- A l'heure où internet met à disposition du plus grand nombre tous les savoirs de base, offrir une lecture originale pour susciter l'intérêt et valoriser l'apport des enseignants.

Le cours se propose donc de répondre de plusieurs manières à une question simple : « où et comment sont stockés durablement les bits élémentaires supports de l'information ? ». Cette interrogation de départ implique la description du phénomène physique pour lequel on fait appel aux notions de base vues précédemment. De là découlent plusieurs questions liées aux modes de lecture et écriture, et au-delà, de durabilité et endurance des dispositifs, voire des systèmes, de stockage de l'information.

Trois types de stockage sont donc traités : stockage optique (CD, DVD, laser) ; stockage électronique (mémoire EEPROM, Flash...) et stockage magnétique (disques durs, MRAM...). Au travers de l'intervention des industriels, les problématiques de fabrication sont abordées pour montrer comment les concepts sont traduits dans la réalité

2. Les technologies du « Stockage de l'information Numérique »

2.1. Généralités sur le stockage de l'information

L'objectif de cette partie introductive est de faire réfléchir l'étudiant sur les enjeux technologiques qui sous-tendent l'évolution du monde numérique actuel suivant la problématique du stockage des données et lui faire prendre conscience que sans l'effort de réduction constante de la surface du bit stocké, la société de l'information telle que nous la connaissons n'aurait pu exister.

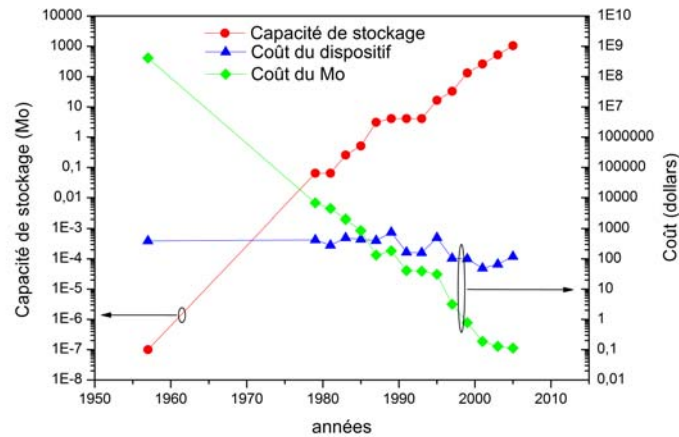


Figure 1 : Evolution des capacités et des coûts du stockage de données depuis les années 1950

La courbe présentée Figure 1 montre qu'à un coût matériel de dispositif décroissant faiblement, la densité d'intégration a crû exponentiellement et le coût du Mo a donc décliné en proportion.

Cette introduction est enfin l'occasion d'introduire les types et les critères de choix des systèmes de stockage en fonction de l'aspect applicatif et donc du volume, de la densité, du temps d'accès et de la durabilité...

2.2. Stockage « optique » : Disques optiques, diffraction et changements de phase, lasers et émission spontanée

Ce module aborde les deux dispositifs clés du stockage optique : le disque optique et la diode laser. La problématique de l'augmentation de la densité du stockage est présentée et liée à la résolution de lecture du laser. On traite en particulier l'impact de la longueur d'onde sur cette résolution.

En l'occurrence, le passage d'une diode laser émettant du rouge (Compact Disc) au bleu (Blu Ray Disc) a été déterminant et a dicté l'évolution technologique de la finesse du trait de gravure du compact disc jusqu'au Blu Ray de 2005.

Sur le plan théorique, le processus de changement de phase rendant les disques réinscriptibles particulièrement détaillé. Enfin l'évolution vers le disque holographique permettant de stocker des données supérieures au To au niveau moléculaire dans des polymères cristaux liquides est décrite.

La deuxième partie traite du mécanisme fondamental de l'émission stimulée pour aborder la diode laser et son évolution vers le bleu avec l'apparition des matériaux à base de GaN.

2.3. Stockage électronique : l'effet tunnel et la mémoire flash, les mémoires intégrées du futur

Le phénomène physique fondamental abordé ici est l'effet tunnel. On montre d'abord que l'apport de la mécanique quantique permet de comprendre en quoi un isolant présente une barrière de potentiel à probabilité de transmission non nulle aux épaisseurs nanométriques.

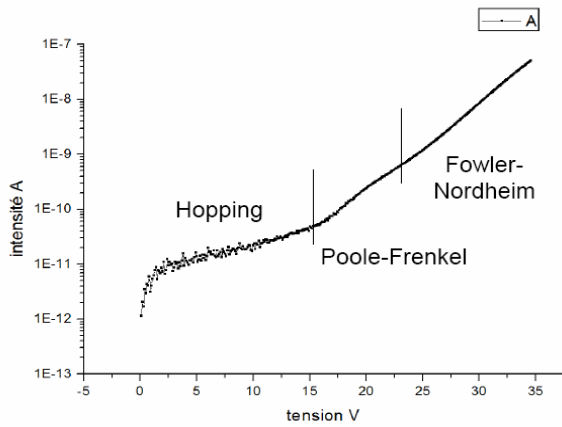


Figure 2 : Courant tunnel dans une structure métal/isolant/métal Ti/Al₂O₃/Ti en fonction de la tension appliquée avec identification des composantes

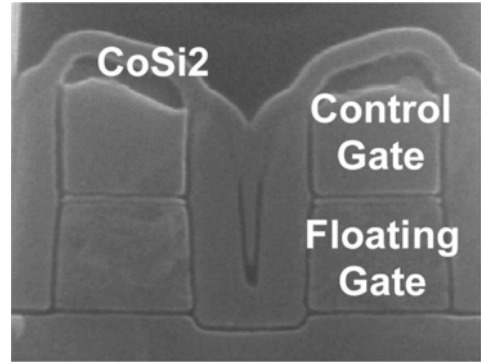


Figure 3 : Vue en coupe des transistors à grille flottante d'une mémoire flash

Cette connaissance permet de comprendre le diagramme de courant tunnel I(V) d'une structure métal-isolant-métal en mettant en évidence des différentes composantes de types : directe, Fowler-Nordheim, Schottky, Frenkel-Poole et hopping (Figure 2).

Cette connaissance fine des courants tunnels est essentielle ceux-ci gouvernent les mécanismes de charge-décharge de la grille flottante dans laquelle sont stockées les charges mémoire (Figure 3). La qualité de l'isolant tunnel influence en particulier le temps de rétention du point mémoire et constitue donc un des points de maîtrise technologique majeurs.

C'est pour traiter les problèmes de perte en rétention sur les mémoires avancées que le concept de mémoires à nanocristaux a été récemment introduit. La description du développement industriel, et en particulier de la caractérisation de telles mémoires à l'échelle atomique fait l'objet de l'intervention d'un industriel de ST Microelectronics.

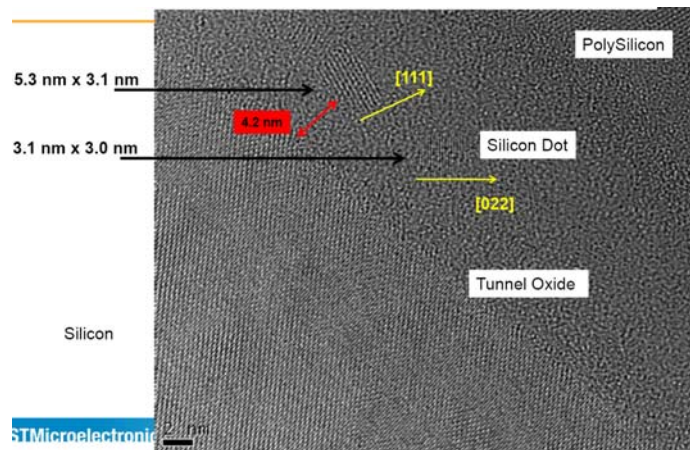


Figure 4 : Image TEM haute résolution d'une coupe de point mémoire à nanocristaux développée (source STMicroelectronics)

2.4. Stockage magnétique : Disque durs et électronique de spin

Le module traitant du stockage magnétique est divisée en deux parties; la première traite des supports magnétiques et de densité d'intégration et la seconde des têtes de lecture/écriture.

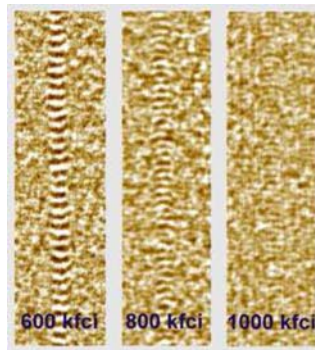


Figure 5: « Impression » magnétique laissée par une tête d'écriture sur un disque dur à différentes vitesses d'écriture

Sur le plan théorique, les fondamentaux du magnétisme sont abordés à travers l'étude des matériaux constituant les disques durs.

Les problématiques de lecture et écriture sont ensuite présentées. La Figure 5 est l'image de « l'impression magnétique » laissée par une tête sur un disque dur en fonction des vitesses d'écriture. La densité du stockage suppose donc une optimisation du système en vitesse de lecture et sensibilité du capteur.

Une voie d'optimisation de cette sensibilité consiste à utiliser l'effet de magnétorésistance géante dont la découverte et la maîtrise ont valu à A. Fert et P. Gruenberg le prix Nobel de physique 2007.

3. Conclusion

Ce cours électif de physique orienté « application » agrège des éléments de physique relativement poussés autour de la thématique du « stockage de l'information numérique ». Il aborde à la fois les phénomènes physiques fondamentaux utilisés pour stocker de l'information de façon durable, par voie optique, électronique ou magnétique et les problématiques technologiques et industrielles afférentes.

Avec un recul d'un an, les élèves ont montré à chaque fois un fort intérêt pour ce cours. Les concepts physiques sont en effet illustrés en permanence par des aspects applicatifs qui permettent de donner un sens stratégique à la progression du cours et d'impliquer l'étudiant dans cette démarche.

Remerciements :

Les auteurs remercient Lahouari Fares du laboratoire RCCAL de ST Microelectronics Rousset pour les images TEM haute résolution