
Table des matières

Avant-propos	9
PREMIÈRE PARTIE. STOCKAGE DE L'INFORMATION ET ETAT DE L'ART DES MEMOIRES ELECTRONIQUES.	11
Chapitre 1. Problèmes généraux liés au traitement et au stockage de l'information. Classification des mémoires et perspectives.	13
1.1. Les problèmes posés par le flux des informations digitales.	13
1.2. Les mémoires électroniques actuelles et leur classification.	15
1.3. Les mémoires du futur	17
1.4. Bibliographie	22
Chapitre 2. Etat de l'art des mémoires électroniques DRAM, SRAM, Flash, HDD et MRAM	25
2.1. Les mémoires volatiles DRAM	25
2.1.1. Principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET (<i>metal oxide semiconductor field effect transistor</i>)	25
2.1.2. Mode de fonctionnement d'une mémoire DRAM	29
2.2. Les mémoires SRAM (<i>static random access memory</i>)	30
2.3. Les mémoires non volatiles issues de la technologie CMOS	33
2.3.1. Principe de fonctionnement d'un MOSFET à grille flottante (<i>floating gate</i>)	34
2.3.1.1. Comment charger et décharger la grille flottante ?	35
2.3.1.2. Les problèmes physiques liés au stockage des charges électriques et leur incidence sur le fonctionnement d'une mémoire à grille flottante	37

2.3.1.3. <i>Multi-level cells</i>	42
2.3.1.4. La qualité des diélectriques : une cause de limitation des performances d'une mémoire à grille flottante (<i>floating gate memory</i>)	44
2.3.1.5. Le talon d'Achille des mémoires à grille flottante	45
2.3.2. Les mémoires Flash.	48
2.3.2.1. Les mémoires Flash NOR et NAND	48
2.3.2.2. Organisation générale des mémoires NAND Flash	51
2.3.2.3. Les perspectives d'évolution des mémoires Flash	53
2.4. Les mémoires magnétiques non volatiles MRAMs et HDDs.	54
2.4.1. La découverte de la magnétorésistance géante (GMR) à l'origine de l'essor des disques durs	55
2.4.1.1. Caractéristiques de la GMR	55
2.4.2. Les vannes de spin	57
2.4.3. Les jonctions magnétiques tunnel (<i>MTJs, magnetic tunnel junctions</i>).	59
2.4.4. Principe de fonctionnement d'un disque dur (HDD)	59
2.4.5. Principe de fonctionnement d'une mémoire magnétique MRAM.	61
2.5. Conclusion	63
2.6. Bibliographie.	64

Chapitre 3. Evolution des mémoires SSD vers les FeRAMs, FeFETs, CTMs et STT-RAMs	69
3.1. L'évolution des DRAMs vers les FeRAMs à ferroélectrique.	70
3.1.1. Caractéristiques d'un matériau ferroélectrique.	70
3.1.2. Principe de fonctionnement d'une mémoire FeRAM	73
3.1.3. Principe de fonctionnement d'une mémoire FeFET.	76
3.1.3.1. Caractéristiques de rétention	78
3.1.3.2. Des matériaux ferroélectriques autres que les oxydes ?	80
3.2. L'évolution des mémoires Flash vers les <i>charge trap memories</i> (CTM)	85
3.3. L'évolution des mémoires magnétiques (MRAM) vers les mémoires à transfert de spin (STT-RAM, <i>spin torque transfer</i>)	90
3.3.1. Nanomagnétisme et implications expérimentales	91
3.3.2. Principe du transfert de moment de spin (<i>spin torque transfer</i>)	92
3.3.3. Evolution récente due à l'utilisation de matériaux à anisotropie magnétique perpendiculaire	95

3.4. Conclusion	97
3.5. Bibliographie.	98

**DEUXIEME PARTIE. L'EMERGENCE DE NOUVEAUX CONCEPTS :
LES MEMOIRES INORGANIQUES NEMS, PCRAM, RRAM
ET ORGANIQUES.**

105

**Chapitre 4. Mémoires volatiles et non volatiles réalisées
à l'aide de NEMS**

107

4.1. Interrupteurs nanoélectromécaniques à deux électrodes.	108
4.1.1. NEMS à bras de levier suspendu	108
4.1.1.1. Fonctionnement et effet mémoire d'un NEMS à bras de levier suspendu	108
4.1.1.2. Description de la technique d'élaboration	111
4.1.2. NEMS à pont suspendu	113
4.1.3. Réseaux croisés de nanotubes de carbone.	114
4.2. Interrupteurs NEMS à trois électrodes	117
4.2.1. Interrupteur à cantilever élaboré par les techniques de lithographie	117
4.2.2. Nano-interrupteurs à nanotubes de carbone.	121
4.2.2.1. Mémoires NEMS avec un nanotube de carbone comme bras de levier	121
4.2.2.2. Mémoires NEMS à nanotubes de carbone « verticaux ».	123
4.2.3. Mémoires hybrides NEMS-MOSFET à grille flottante mobile ou à cantilever mobile	126
4.2.3.1. Mémoires à grille flottante mobile.	126
4.2.3.2. Mémoires à cantilever mobile et à nanotube de carbone fixe	127
4.3. Conclusion	130
4.4. Bibliographie.	131

**Chapitre 5. Mémoires électroniques non volatiles à changement
de phase (PCRAM)**

135

5.1. Fonctionnement d'une mémoire électronique à changement de phase.	137
5.1.1. Constitution et fonctionnement d'une mémoire PCRAM à GST	137

5.1.2. L'antinomie entre la résistance élevée de l'état amorphe et un échauffement rapide	140
5.2. Caractéristiques physicochimiques comparées de quelques matériaux à changement de phase.	145
5.3. Quelques paramètres déterminants pour l'optimisation du fonctionnement des mémoires à PCM	147
5.3.1. Influence de la géométrie des cellules sur l'intensité du courant I_m nécessaire à la fusion du cristal	148
5.3.2. Optimisation de la composition des alliages à changement de phase pour l'amélioration des vitesses de transition <i>Set</i> et <i>Reset</i>	152
5.3.2.1. Effet des variations de composition entre les éléments Ge, Sb et Te	153
5.3.2.2. Dopage du GST par des éléments autres que Ge, Sb ou Te	154
5.3.3. Influence d'une nanostructuration de la couche du matériau à changement de phase.	158
5.3.3.1. Couches alternées de GeTe et Sb_2Te_3	158
5.3.3.2. Interprétation de l'effet de structuration de la couche GST sur les vitesses de commutation	162
5.3.4. Techniques récentes proposées pour améliorer les vitesses d'amorphisation et de cristallisation des matériaux à changement de phase.	165
5.3.4.1. Procédures nouvelles d'amélioration des vitesses de cristallisation sans modification des propriétés de rétention.	165
5.3.4.2. Amorphisation sans fusion induite par des impulsions électriques de quelques centaines de picosecondes.	167
5.3.5. Les problèmes liés à l'interconnexion des cellules PCRAM dans une architecture de type <i>3D crossbar</i>	169
5.4. Conclusion	171
5.5. Bibliographie	171
Chapitre 6. Mémoires résistives (RRAM)	177
6.1. Principales caractéristiques des mémoires résistives.	180
6.1.1. Système unipolaire	181
6.1.2. Système bipolaire	182
6.2. Les mémoires électrochimiques à métallisation	183
6.2.1. Interrupteurs atomiques (<i>Atomic Switch</i>)	185
6.2.2. Les mémoires à métallisation comportant un isolant ou un semi-conducteur.	188
6.2.2.1. Composant Cu/SiO ₂ /Pt	188

6.2.2.2. Composant Ag/ZnO/Pt	190
6.2.3. Conclusions relatives au fonctionnement des mémoires à métallisation.	193
6.3. Les mémoires résistives à changement de valence (VCM, <i>valence change memory</i>).	194
6.3.1. Les premiers travaux relatifs aux mémoires résistives	194
6.3.2. Les mémoires résistives après les années 2000	195
6.3.3. Une mémoire résistive à pérovskite (SrZrO ₃) avec des performances meilleures que celles des mémoires Flash	196
6.3.4. Les mécanismes d'électroformage et de commutation (RS, <i>resistive switching</i>).	199
6.3.4.1. Les processus d'électroformage EF (<i>electroforming</i>)	200
6.3.4.2. Mécanismes de commutation résistive RS (<i>Resistive Switching</i>).	202
6.3.5. L'oxyde de hafnium pour la réalisation de mémoires résistives universelles ?	205
6.4. Conclusion	207
6.5. Bibliographie.	208
Chapitre 7. Mémoires électroniques organiques non volatiles	213
7.1. Mémoires organiques de type Flash	216
7.1.1. Dispositif flexible FG-OFET à grille flottante métallique	216
7.1.1.1. Construction de l'OFET à grille flottante et caractéristiques électriques	217
7.1.1.2. Construction du capteur de pression.	220
7.1.2. FG-OFET flexible à grille flottante organique entièrement élaboré par <i>spin coating</i> et <i>inkjet printing</i>	223
7.1.2.1. Elaboration du FG-OFET par des protocoles de chimie des solutions (<i>all-solution processable FG-OFET</i>)	223
7.1.2.2. Caractéristiques électriques du <i>all solution processed</i> <i>FG-OFET</i>	225
7.1.3. OFETs flexibles à piégeage de charges dans le diélectrique de grille (<i>Flexible OFETs with charge-trap gate dielectrics</i>)	227
7.1.3.1. Principe de fonctionnement des OFETs à électrets polymères.	228
7.1.3.2. OFETs à électret polymère élaborés sur papier	230
7.1.4. OFETs à nanoparticules conductrices encapsulées dans le diélectrique de grille	232
7.1.4.1. Elaboration de l'OFET à NPs d'or	232
7.1.4.2. Caractéristiques de fonctionnement	234

7.1.5. Les OFETs à diélectriques rédox	236
7.1.5.1. Elaboration du transistor « rédox »	237
7.1.5.2. Fonctionnement du transistor.	238
7.2. Mémoires organiques résistives à deux contacts	240
7.2.1. Mémoires organiques à métallisation électrochimique	241
7.2.1.1. Composants M/I/M' à polymère électrolyte	241
7.2.1.2. Composants M/I/M' à polymère conducteur.	242
7.2.2. Mémoires organiques résistives à piégeage de charges (<i>resistive charge-trap organic memory</i>)	247
7.2.2.1. Composant résistif M/I-m-I/M' avec « m » couche intermédiaire de piégeage des charges électriques.	247
7.2.2.2. Composant résistif M/I/M' à NPs métalliques d'or.	249
7.3. Mémoires moléculaires	252
7.4. Conclusion	255
7.5. Bibliographie	256
Conclusion	261
Index	265