

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| La série <i>Gestion de l'énergie dans les systèmes embarqués</i> | 9 |
| Préface | 11 |
| Philippe PERDU | |
| Avant-propos | 13 |
| Introduction | 17 |
| Chapitre 1. Les normes ESD : du composant au système | 27 |
| 1.1. Normes : du composant au système | 27 |
| 1.1.1. Une électronique de plus en plus sensible. | 27 |
| 1.1.2. Les exigences de robustesse des systèmes embarqués | 28 |
| 1.2. Normes au niveau composant : HBM, MM, CDM, HMM | 29 |
| 1.3. Normes au niveau système. | 33 |
| 1.3.1. La norme IEC 61000-4-2 ou pistolet ESD | 34 |
| 1.3.2. Problèmes liés à la norme IEC 61000-4-2 | 39 |
| 1.3.3. Modèle HMM (<i>human metal model</i>) | 40 |
| 1.3.4. Modèle standard ISO 10605. | 42 |
| 1.3.5. Modèle CDE (<i>cable discharge event</i>) | 43 |
| 1.4. Conclusion | 44 |
| Chapitre 2. Techniques de caractérisation | 47 |
| 2.1. Techniques de caractérisation électrique au niveau composant | 48 |
| 2.1.1. La mesure TLP/VF-TLP. | 49 |

| | |
|---|----|
| 2.1.2. Extraction de paramètres transitoires grâce au TLP (<i>transient-TLP</i>) | 51 |
| 2.1.3. Adaptation du TLP pour la réflectométrie | 53 |
| 2.1.3.1. Principe de la mesure par réflectométrie | 53 |
| 2.1.3.2. Application de la méthode TDR aux événements ESD | 59 |
| 2.1.3.3. Mise en œuvre de l'outil TDR/TLP | 61 |
| 2.2. Méthodes de mesure système | 64 |
| 2.2.1. Mesure de tensions par sonde | 64 |
| 2.2.2. Mesure des courants de masse par une méthode 1Ω | 65 |
| 2.2.3. Mesure des courants par champ magnétique induit | 67 |
| 2.2.3.1. Couplage magnétique : théorie | 67 |
| 2.2.3.2. Reconstitution du courant | 72 |
| 2.2.3.3. Expérimentation et validation | 75 |
| 2.2.3.4. Mesure des courants grâce aux sondes magnétiques de champ proche | 75 |
| 2.2.3.5. Cartographie dynamique des circulations de courant | 78 |
| 2.3. Méthodes d'injection | 80 |
| 2.3.1. Injection en mode conduit : méthode DPI | 81 |
| 2.3.2. Injection par champ proche | 82 |
| 2.4. Techniques d'analyse de défaillance | 84 |
| 2.4.1. Microscopie à émission de lumière statique (EMMI) | 84 |
| 2.4.2. Microscopie à émission de lumière dynamique (PICA) | 85 |
| 2.4.3. Techniques de stimulation laser | 87 |
| 2.4.3.1. Stimulation thermique laser (STL) | 88 |
| 2.4.3.2. Stimulation photoélectrique laser (SPL) | 89 |
| 2.4.4. Détection de défauts latents par mesures de bruit à basses fréquences | 91 |
| 2.5. Conclusion | 94 |

Chapitre 3. Stratégies de protection vis-à-vis des ESD 95

| | |
|--|-----|
| 3.1. Fenêtre de conception ESD | 95 |
| 3.2. Composants élémentaires de protection | 100 |
| 3.2.1. Stratégies de protection | 100 |
| 3.2.2. Structures élémentaires de protection | 104 |
| 3.2.2.1. Diodes | 105 |
| 3.2.2.2. Transistors bipolaires | 106 |
| 3.2.2.3. Transistors MOS | 111 |
| 3.2.2.4. Thyristors | 119 |
| 3.2.2.5. Protection ESD de technologies mixtes | 123 |

| | |
|--|-----|
| 3.3. Protections discrètes | 125 |
| 3.4. Défis de la stratégie de protection au niveau système | 127 |
| 3.5. Conclusion | 133 |

Chapitre 4. Méthodologies de modélisation et de simulation 135

| | |
|--|-----|
| 4.1. Simulation physique : approche TCAD pour l'optimisation de protections élémentaires | 135 |
| 4.1.1. Description de la structure | 137 |
| 4.1.2. Étalonnage du simulateur | 139 |
| 4.1.3. Phénomènes de focalisation | 143 |
| 4.1.4. Prédiction de la robustesse | 143 |
| 4.1.4.1. Focalisation sur un doigt | 146 |
| 4.1.4.2. Focalisation sur une zone du doigt | 147 |
| 4.1.5. Apport de la modélisation 3D | 149 |
| 4.2. Simulation électrique : modélisation compacte | 150 |
| 4.2.1. Modélisation des diodes | 151 |
| 4.2.2. Modélisation du transistor bipolaire | 152 |
| 4.2.2.1. Caractéristique statique | 152 |
| 4.2.2.2. Comportement dynamique | 157 |
| 4.2.2.3. Extraction des paramètres du modèle | 158 |
| 4.2.3. Modélisation du transistor MOS | 159 |
| 4.2.4. Modélisation du thyristor | 164 |
| 4.3. Simulation comportementale pour la prédiction au niveau système | 166 |
| 4.3.1. Les modèles IBIS : intérêt et limitation | 168 |
| 4.3.1.1. Importance des éléments de boîtier et des éléments passifs internes | 169 |
| 4.3.1.2. Rôle des diodes délivrées par IBIS | 172 |
| 4.3.1.3. Rôle des buffers de sortie délivrés par IBIS | 174 |
| 4.3.1.4. Conclusion sur les fichiers IBIS : amélioration | 177 |
| 4.3.2. Mise en œuvre d'un réseau d'alimentation | 178 |
| 4.3.3. Extraction de paramètres à partir de mesures | 179 |
| 4.3.3.1. Approche par la modélisation compacte | 179 |
| 4.3.3.2. Approche par la modélisation comportementale | 181 |
| 4.3.3.3. Méthodologie de modélisation comportementale | 182 |
| 4.3.3.4. Mise en œuvre d'une structure à retournement | 183 |
| 4.3.4. Application à la modélisation des systèmes | 186 |
| 4.3.5. Validation des modèles comportementaux pour l'approche système | 188 |
| 4.3.5.1. Analyse quasi statique | 188 |
| 4.3.5.2. Simulations transitoires | 190 |
| 4.3.5.3. Performance en termes de temps de calcul | 193 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.6. Ajout de critères de défaillance | 195 |
| 4.3.6.1. Défaillance matérielle | 195 |
| 4.3.6.2. Défaillance fonctionnelle | 197 |
| 4.4. Conclusion | 198 |
| Chapitre 5. Études de cas | 199 |
| 5.1. Cas n° 1 : interaction entre deux types de protection | 199 |
| 5.2. Cas n° 2 : détection de défauts latents engendrés par stress CDM. | 204 |
| 5.3. Cas n° 3 : impact d'une capacité de découplage sur les chemins de propagation dans un circuit | 212 |
| 5.3.1. Analyse de la configuration de test n° 1 | 214 |
| 5.3.2. Validation des résultats par la mesure de cartographie par champ proche | 220 |
| 5.3.3. Analyse de la configuration de test n° 2 | 222 |
| 5.4. Cas n° 4 : défaillance fonctionnelle liée à la capacité de découplage. | 225 |
| 5.5. Cas n° 5 : défaillance fatale dans un circuit LIN | 232 |
| 5.6. Cas n° 6 : défaillance fonctionnelle dans un microcontrôleur 16 bits | 239 |
| 5.6.1. Description du circuit microcontrôleur 16 bits étudié et des conditions de test | 240 |
| 5.6.2. Résultats de mesure. | 242 |
| 5.6.3. Modélisation et simulation de l'étude | 246 |
| 5.7. Conclusion | 249 |
| Conclusion | 251 |
| Bibliographie | 259 |
| Index | 277 |