
Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1. Dégradation du temps de montée dans les interconnexions . . .	15
1.1. Problèmes de propagation dans les interconnexions	15
1.1.1. Evolution des circuits numériques	15
1.1.2. Evolution des signaux dans les interconnexions	17
1.1.3. Temps de propagation sur les interconnexions	18
1.1.3.1. Retard de propagation dans les circuits intégrés	19
1.1.4. Encombrement spectral des signaux	20
1.2. Comportement des composants en hautes fréquences	21
1.2.1. Comportement des fils de liaison	22
1.2.2. Comportement d'une résistance en RF	22
1.2.3. Comportement d'une inductance en RF	23
1.2.4. Comportement d'une capacité en RF	24
1.2.5. Effets des pertes dues aux conducteurs : effet de peau	25
1.3. Conséquence sur la transmission des signaux dans les interconnexions	27
1.3.1. Filtrage par le canal de transmission	27
1.3.2. Dégradation du temps de montée dans un canal à bande limitée	28
1.3.3. Exemple d'un filtre RC passe-bas du 1 ^{er} ordre	29
1.3.4. Effets des pertes résistives par effet de peau	30
1.3.5. Temps de montée de circuits en cascade	32
1.3.6. Critère de qualité de transmission : diagramme de l'œil	33
1.4. Mesure du temps de montée	34
1.4.1. Différentes définitions du temps de montée	34

1.4.2. Principe de mesure	34
1.4.3. Effet de la sonde de mesure	35
1.5. Conclusion	36
Chapitre 2. Modélisation électromagnétique des interconnexions	37
2.1. Modélisation globale de l'intégrité du signal	37
2.1.1. Modèles ICEM et ICIM	37
2.1.2. Modèles IBIS	38
2.1.3. Caractéristiques I/V des buffers	39
2.2. Modèle RC des interconnexions	40
2.2.1. Modèle RC	41
2.2.2. Constante d'Elmore.	41
2.3. Modélisation capacitive et inductive	42
2.3.1. Modélisation capacitive	43
2.3.2. Modélisation inductive.	44
2.3.2.1. Inductance au sens de Maxwell	45
2.3.2.2. Inductance au sens de Kirchoff.	45
2.3.3. Application aux circuits d'interconnexion	46
2.3.3.1. Inductance et capacité linéiques	47
2.3.3.2. Inductance et capacité de couplage	47
2.4. Modélisation LC de ligne	48
2.5. Application aux boîtiers et MCM	52
2.5.1. Différents types de boîtiers	52
2.5.2. Les boîtiers multipuces (MCM)	53
2.5.3. Modélisation LC des boîtiers	54
2.5.4. Simulations électromagnétiques 2.5D et 3D	57
2.6. Conclusion	59
Chapitre 3. Interconnexions à impédance contrôlée.	61
3.1. Pourquoi contrôler l'impédance ?	61
3.1.1. Effet de la longueur de l'interconnexion	62
3.1.2. Classification des interconnexions par le signal véhiculé	65
3.2. Influence du temps de montée sur la dégradation des signaux	66
3.3. Modèle d'interconnexion à impédance contrôlée.	67
3.3.1. Impédance caractéristique : définition.	68
3.3.2. Configuration d'interconnexions à impédance contrôlée.	68
3.4. Interconnexions au niveau du circuit imprimé	70
3.4.1. Interconnexions sur PCB	70
3.4.2. Transition entre les lignes et discontinuité	72

3.4.2.1. Transition coaxial/microruban	72
3.4.2.2. Transition sur PCB à PCB	73
3.4.3. Extraction des valeurs du schéma équivalent.	74
3.5. Contrôle d'impédance pour une configuration microruban.	76
3.5.1. Effet de la permittivité effective	76
3.5.2. Contraintes sur un circuit numérique typique	76
3.5.3. Effet de l'épaisseur du ruban ou de la résine de protection.	78
3.6. Analyse de la propagation dans les interconnexions.	79
3.6.1. Réflexion et transmission sur une terminaison.	79
3.6.2. Réflexion et transmission lors d'une rupture d'impédance.	80
3.6.3. Réflexion et transmission sur un bus.	81
3.6.4. Adaptation des lignes.	82
3.7. Conséquence sur la configuration des bus de données	83
3.8. Application à la distribution d'horloge.	84
3.9. Conclusion	86
Chapitre 4. Modes de propagation dans les interconnexions	87
4.1. Modèle de ligne de transmission	87
4.1.1. Modes de propagation sur les lignes	88
4.1.1.1. Mode TEM pur sans pertes	88
4.1.1.2. Mode quasi-TEM (avec pertes métalliques)	88
4.1.1.3. Mode quasi-TEM (avec pertes métalliques et les pertes diélectriques)	89
4.2. Modes de propagation dans les circuits intégrés	90
4.2.1. Mode quasi-TEM	91
4.2.2. Mode d'effet de peau.	92
4.2.3. Mode d'onde lente	93
4.2.4. Zone de transition	94
4.3. Equation de propagation sur les lignes de transmission	95
4.3.1. Equation de propagation.	96
4.3.2. Impédance ramenée.	99
4.3.3. Comportement interconnexion en fonction de la longueur et des charges	100
4.3.4. Cas des lignes électriquement courtes	101
4.4. Conclusion	101
Chapitre 5. Technique de test et paramètres S	103
5.1. Définition des paramètres mesurés en hautes fréquences	103
5.1.1. Réflexion et transmission	103

5.1.2. Coefficient de réflexion et ROS sur les interconnexions	105
5.2. Principe des paramètres S	106
5.2.1. Définitions	106
5.2.2. Impédance d'entrée d'un circuit terminé par une impédance	108
5.3. Mesure des paramètres S	109
5.3.1. Calibrages standards d'un analyseur vectoriel	110
5.3.2. Calibrage <i>Short, Open, Load, Thru</i> (SOLT)	110
5.3.3. Calibrage TRL	112
5.3.4. Technique de mesure <i>one port</i>	113
5.4. Mesure d'impédance caractéristique de ligne	114
5.4.1. Méthode du court-circuit et circuit ouvert	114
5.4.2. Méthode de la ligne chargée par R0	116
5.4.3. Ligne équivalente à partir des paramètres S	117
5.5. Mesure de la capacité de ligne	117
5.5.1. Méthode du circuit ouvert et court-circuit	118
5.5.2. Mesure avec la méthode de la ligne chargée	118
5.6. Composants sur PCB et techniques de <i>deembedding</i>	119
5.6.1. Mesure d'une impédance sur PCB	119
5.6.2. Matrices chaînes T et C	120
5.6.3. Matrice ABCD d'une ligne de transmission	121
5.6.4. Procédure de <i>deembedding</i>	123
5.7. Caractérisation des matériaux diélectriques pour les interconnexions	125
5.7.1. Méthode de la capacité MIM pour les isolants dans les technologies intégrées	125
5.7.2. Permittivité effective d'une ligne de transmission	127
5.7.3. Cas de la ligne microruban, triplaque ou coplanaire	128
5.8. Conclusion	129
Chapitre 6. Analyse par la réflectométrie temporelle	131
6.1. Principe de la réflectométrie temporelle	131
6.2. Réflexion et transmission de la tension	132
6.2.1. Les tensions observables	133
6.2.2. Effets des réflexions multiples dans les circuits haut débit	135
6.3. Mesure d'impédance caractéristique	135
6.3.1. Mesure d'impédance avec un générateur d'impulsions	135
6.3.2. Mesure d'impédances avec un échelon	137
6.3.3. Cas d'impédances en cascade	138
6.4. Réflexion sur des charges réactives	139
6.5. Extraction de schémas équivalents	140

6.5.1. Définition du schéma équivalent	140
6.5.2. Extraction d'une discontinuité ou d'un composant inductif	142
6.5.3. Cas d'une discontinuité ou d'un composant capacitif.	144
6.5.4. Cas d'une inductance série et d'une capacité parallèle	147
6.6. Discontinuités en cascade	148
6.6.1. Résolution spatiale	148
6.6.2. Exemple d'extraction d'inductance et de capacité.	149
6.7. Conclusion	150
Chapitre 7. Interférences et diaphonie dans les interconnexions	153
7.1. Couplage et interférences dus au substrat	153
7.1.1. Modèle ICEM pour le couplage substrat	154
7.1.2. Anneau de garde et caisson d'isolation	156
7.2. Théorie du couplage entre lignes	156
7.2.1. Modèle du couplage entre lignes	157
7.2.2. Signaux de couplage sur les terminaisons.	161
7.2.3. Modèle de couplage dans les interconnexions sur PCB.	161
7.2.4. Signaux de paradiaphonie (NEXT) et de télédiaphonie (FEXT) sur PCB	165
7.3. Application aux câbles, bus et connecteurs haut débit.	166
7.3.1. Contraintes dans les bus haut débit.	166
7.3.2. Normalisation des câbles de transmission de données	168
7.3.3. Catégories des systèmes Ethernet haut débit	169
7.4. Conclusion	171
Bibliographie	173
Index	175