



LABORATOIRE D'INFORMATIQUE DE PARIS 6

Architecture des Systèmes Intégrés et Micro-Électronique

**Modèles et méthodes probabilistes
pour l'évaluation de la
consommation des circuits intégrés
VLSI**

J. Dunoyer

THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ PARIS 6
LIP6 1999 / 027

juillet 1999

Résumé

Cette thèse présente une méthode alternative à la simulation pour l'évaluation de la consommation électrique des circuits intégrés VLSI.

Nous travaillons sur un réseau de portes orientées. Nous modélisons la consommation de chaque porte par un automate dont les transitions s'accompagnent d'une dissipation d'énergie. Le cœur de notre travail porte sur le calcul des fréquences de transition qui dépendent fortement du contexte d'utilisation du circuit. Pour réaliser ce calcul, nous développons une méthode d'analyse probabiliste qui s'appuie sur un nouveau modèle stochastique du comportement logique du signal. Chaque signal est caractérisé par une probabilité d'état au niveau cycle, une probabilité de transition au niveau cycle et une suite périodique de probabilités de transition instantanées. Ce modèle permet de considérer le comportement synchrone des éléments mémorisants sans négliger les changements d'état transitoires dans les parties combinatoires.

Les probabilités sont propagées à travers les portes par une simulation symbolique à pilotage événementiel impliquant le calcul de fonctions de transfert probabilistes sur une décomposition de Shannon réduite des fonctions booléennes. Les problèmes de corrélations statistiques sont résolus par la construction de *Supergates* sur des ensembles de variables quasiment indépendantes. Pour optimiser cette résolution, nous proposons une nouvelle heuristique qui s'appuie sur l'expression de l'erreur engendrée par les corrélations et qui exploite la fonctionnalité des portes et les probabilités des signaux. Pour le calcul des probabilités de transition instantanées, nous proposons une méthode originale s'appuyant sur la décomposition des *Supergates* en chemins de transfert et l'expression d'une fonction de transition pour chaque chemin. Cette méthode tient compte des corrélations spatiales et temporelles et traduit les phénomènes de génération et de propagation d'états transitoires.

Notre méthode probabiliste est mise en œuvre par le logiciel PROPAGATE. Les résultats obtenus pour des circuits complexes démontrent la pertinence de nos propositions et témoignent qu'une analyse probabiliste de la consommation des circuits VLSI peut être une solution aussi précise et beaucoup plus rapide qu'une simulation.

Mots clés

vérification des circuits intégrés – modélisation et évaluation de la consommation électrique
simulation probabiliste – simulation symbolique – analyse statique

Table des Matières

1. Introduction.....	9
1.1. Les recherches en France et à l'étranger	11
1.2. Objectifs et cadre de cette thèse	12
1.3. Organisation du document.....	13
2. Problématique et objectifs.....	15
2.1. Cadre et limites de notre étude	16
2.1.1. La place de l'évaluation de la consommation électrique.....	16
2.1.2. Famille de circuits ciblée	16
2.2. Problématique de l'évaluation de consommation.....	17
2.3. Modélisation du circuit.....	18
2.3.1. Réseau de transistors et approche <i>switch-level</i>	18
2.3.2. Réseau de portes.....	19
2.4. Modélisation de la consommation des portes CMOS	22
2.4.1. Contributions à la consommation des portes CMOS.....	22
2.4.2. Modèles événementiels de la consommation des portes CMOS	23
2.4.3. Choix d'un modèle événementiel de la consommation	25
2.5. Évaluation des paramètres du modèle de consommation.....	26
2.5.1. Évaluation des paramètres électriques	27
2.5.2. Évaluation des paramètres logiques.....	27
2.6. Modèles, principes et problèmes de l'analyse probabiliste	31
2.6.1. Modélisation stochastique du comportement logique du signal	31
2.6.2. Principes de l'analyse probabiliste au niveau cycle	35
2.6.3. Les problèmes clefs de l'analyse probabiliste.....	36
2.7. Conclusions	37

3. État de l'art de l'analyse probabiliste	39
3.1. Calcul probabiliste au niveau cycle	40
3.1.1. Méthode des supernœuds	40
3.1.2. Alternatives au calcul probabiliste des supernœuds.....	41
3.1.3. Méthodes de calcul de la probabilité d'état.....	44
3.1.4. Méthodes de calcul de la probabilité de transition.....	48
3.2. Résolution des problèmes de corrélations spatiales	51
3.2.1. Méthodes exactes de résolution des corrélations spatiales	52
3.2.2. Heuristiques de <i>distance</i>	55
3.3. Modélisation et analyse des événements transitoires	58
3.3.1. Sensibilité des portes aux événements transitoires	60
3.3.2. Formes d'ondes probabilistes.....	63
3.3.3. Comportement logique asynchrone et corrélations.....	68
3.4. Conclusions	72
4. Modèle et méthode d'analyse probabiliste	75
4.1. Modélisation des circuits synchrones.....	76
4.1.1. Définition des circuits synchrones	76
4.1.2. Modélisation du circuit par un réseau booléen	76
4.1.3. Modèle de délai et normalisation du temps	77
4.2. Modélisation stochastique des circuits synchrones.....	78
4.2.1. Modèle stochastique conjugué	79
4.2.2. Stationnarité des probabilités <i>au niveau cycle</i>	81
4.2.3. Stationnarité des probabilités instantanées	82
4.3. Méthode d'analyse probabiliste.....	84
4.3.1. Stimuli probabilistes	84
4.3.2. Simulation probabiliste du comportement synchrone.....	85
4.3.3. Simulation probabiliste du comportement transitoire.....	89
4.4. Conclusions	99

5.	Recherche des ensembles de variables indépendantes	101
5.1.	Recherche des <i>Supergates</i>	102
5.1.1.	Algorithme de S. C. Seth et F. N. Najm.....	103
5.1.2.	Faiblesses de l'algorithme de S. C. Seth.....	105
5.1.3.	Nouvel algorithme de recherche des <i>Supergates</i>	106
5.1.4.	Conclusions à propos de la recherche des <i>Supergates</i>	112
5.2.	Étude de l'erreur en présence de corrélations.....	113
5.2.1.	Principes et objectifs de cette étude	113
5.2.2.	Formulation de $\Delta[P(\mathcal{F})]$	114
5.2.3.	Étude et calcul de la sensibilité aux corrélations $S_{AB}^{\mathcal{F}}$	116
5.2.4.	Étude et calcul du coefficient de corrélation C_{AB}	117
5.2.5.	Nouvelle formulation de $\Delta[P(\mathcal{F})]$	123
5.2.6.	Cas particulier des fonctions insensibles aux corrélations.....	126
5.3.	Applications du calcul d'erreur à la recherche de variables... ..	129
5.3.1.	Une nouvelle heuristique de distance.....	129
5.3.2.	Une heuristique s'appuyant sur un calcul exact de $\Delta[P(\mathcal{F})]$	137
5.4.	Conclusions	142
6.	Mise en œuvre logicielle	145
6.1.	Le logiciel PROPAGATE et la plate-forme POW-WOW	147
6.1.1.	La description d'un réseau de portes.....	148
6.1.2.	Les délais des portes.....	148
6.1.3.	Les stimuli et les résultats probabilistes.....	149
6.2.	L'architecture du logiciel PROPAGATE.....	150
6.2.1.	Chargement et construction du réseau booléen.....	151
6.2.2.	Recherche des ensembles de variables indépendantes.....	151
6.2.3.	Analyse probabiliste au niveau cycle	153
6.2.4.	Analyse probabiliste instantanée.....	153
6.2.5.	Traitement des résultats	154
6.3.	GSS : Moteur de Simulation Générique et Symbolique.....	155
6.3.1.	Les principes d'une simulation GSS.....	155

6.3.2. Les étapes d'une simulation GSS.....	157
6.3.3. Les fonctions à fournir par l'application cliente	159
6.3.4. Les fonctions fournies par la librairie GSS	161
6.3.5. Échéancier	162
6.4. Conclusions	163
7. Résultats et performances	165
7.1. Méthode d'analyse des performances du logiciel PROPAGATE.....	166
7.2. Évaluation de la précision de l'analyse probabiliste.....	168
7.2.1. Qualité du calcul des probabilités d'état au niveau cycle	170
7.2.2. Qualité du calcul des densités de transition au niveau cycle.....	177
7.2.3. Qualité du calcul des probabilités d'état instantanées.....	181
7.2.4. Qualité du calcul des densités de transition instantanées.....	184
7.2.5. Qualité du calcul de la consommation	187
7.3. Performances du logiciel PROPAGATE en temps de calcul.....	189
7.3.1. Le temps de calcul en fonction de la complexité des Supergates	189
7.3.2. Le temps de calcul en fonction de la complexité des circuits	191
7.3.3. Le temps de calcul des quatre étapes de l'analyse probabiliste	193
7.3.4. Conclusions à propos des temps de calcul du logiciel PROPAGATE....	193
7.4. Les limites du logiciel PROPAGATE	195
7.4.1. Expérience des Additionneurs	195
7.4.2. Expérience des Shifters.....	196
7.4.3. Expérience des Multiplieurs.....	197
7.4.4. Expérience d'un multiplieur avec pipe-line	200
7.4.5. Expérience du MIPS R3000.....	201
7.5. Conclusions	202
8. Conclusions.....	203
8.1. Principes de notre méthode d'analyse probabiliste	204
8.2. Performances de notre méthode d'analyse probabiliste	205
8.3. Évolutions et limites de l'analyse probabiliste.....	206
Bibliographie.....	209

A. Modèles événementiels de la consommation des portes CMOS	A-1
A.1. Le modèle de l'inverseur généralisé.....	A-2
A.2. Le modèle DesignPower.....	A-3
A.3. Le modèle STGPE complet.....	A-4
A.4. Le modèle ASPEN	A-5
A.5. Conclusions sur les modèles de la consommation des portes	A-6
A.6. Le Modèle IOTA	A-9
B. Modélisation stochastique du signal	B-1
B.1. variables aléatoires binaires.....	B-2
B.2. Processus stochastiques binaires	B-5
B.3. Modèle stochastique des signaux	B-10
B.4. Conclusions	B-16
C. Hypothèse de la stationnarité des probabilités d'état instantanées	C-1
C.1. Étude qualitative.....	C-2
C.2. Étude quantitative.....	C-4
D. Calcul des fonctions de transfert probabilistes.....	D-1
D.1. Les graphes de décision binaire.....	D-2
D.2. Calcul de la probabilité d'état	D-4
D.3. Calcul de la probabilité de transition au niveau cycle.....	D-5
D.4. Calcul des probabilités de transition instantanées.....	D-10
D.5. Calcul probabiliste pour les nœuds reconvergents	D-15
D.6. Calcul du coefficient de corrélation $D_{X_i}^S$	D-22
D.7. Calcul de la sensibilité aux corrélations S_{X_i, X_j}^F	D-24

E. Ensembles de variables et <i>Supergates</i>	E-1
E.1. Réseau booléen.....	E-2
E.2. Éléments de la théorie des graphes.....	E-2
E.3. Ensemble de variables	E-6
E.4. Ensemble minimal de variables indépendantes et <i>Supergate</i>	E-11
F. Une classe de fonctions booléennes insensibles aux corrélations	F-1
F.1. Propriétés des cofacteurs de \mathcal{F} par rapport à A et B	F-2
F.2. Propriétés des dérivées partielles de \mathcal{F} par rapport à A et B.....	F-4
F.3. Exemples de fonctions insensibles aux corrélations	F-5
F.4. Exploitation de l'insensibilité aux corrélations	F-6
G. Pow-Wow : une plate-forme logicielle pour l'évaluation de la consommation..	G-1
G.1. Vue d'ensemble de la plate-forme Pow-Wow.....	G-2
G.2. Les formats de fichiers : <i>prb</i> / <i>pow</i> / <i>nrj</i>	G-7
G.3. Mkpat : Génération pseudo-aléatoire de stimuli logiques.....	G-10
G.4. Simulad : un simulateur logico-temporel	G-12
G.5. XSCP : une aide à l'analyse de la consommation	G-19