



Proposition d'ACTION SPECIFIQUE :

Méthodologie de Fiabilité et techniques d'analyse

Coordination : O. Bonnaud, IETR, olivier.bonnaud@univ-rennes1.fr

D. Lewis, IXL, lewis@ixl.u-bordeaux.fr

Mots-clés : structures WLR, paramétrage lois de dégradation, tests génériques, modélisation de distribution de durée de vie, analyse sans contact, excitation laser.

1/ Introduction

Depuis une dizaine d'années, il apparaît qu'un des facteurs majeurs conditionnant le développement de la microélectronique est la fiabilité des composants, des circuits intégrés et des assemblages, MCM ou cartes montées en surface. Il en est de même pour les microsystèmes dont le développement est conditionné par la démonstration d'une fiabilité opérationnelle satisfaisante.

Cet action spécifique s'attache plus particulièrement à **l'approche de la fiabilité et à la méthodologie de son évaluation**. Cette approche peut se situer à plusieurs niveaux dans le cycle de fabrication, aussi bien au niveau des étapes élémentaires, des composants en cours de fabrication ou des composants finis avant et après encapsulation. L'objectif est de réduire au maximum la durée des tests de démonstration de fiabilité qui deviennent par ailleurs de plus en plus difficiles à mettre en œuvre avec les taux de défaillances extrêmement bas à démontrer (jusqu'à 1 FIT). Cette partie comporte la conception et l'utilisation de structures spécifiques de type WLR, ainsi que l'introduction de données SPC dans les lois de dégradation pour la modélisation de lois de distribution de défaillances prévisionnelles.

Dans le même temps, un effort particulier doit être effectué vers le développement de nouvelles techniques d'analyse non-destructives adaptées à l'intégration des circuits. Ces techniques d'analyse sous contraintes constituent un support **indispensable à la qualification des composants** et à la démonstration de leur fiabilité. Pour les technologies semiconducteur intégrées, outre les techniques d'analyse par faisceau d'électrons, celles utilisant l'excitation laser (OBIC, OBIRCH, ..) font une percée remarquable car elles permettent notamment un diagnostic « face arrière » des composants.

Une analyse préliminaire des besoins prioritaires ainsi que de la communauté qui peut être rassemblée sur ce sujet en France doit être effectuée. Pour cela, *une action spécifique est proposée sur ce thème*.

2/ Techniques d'analyse sans contact des circuits intégrés

Les techniques d'analyse sans contact des circuits intégrés sont complémentaires des techniques basées sur le diagnostic électrique ou l'analyse physico-chimique et permettent de mettre en œuvre des analyses de défaillance non destructives qui garantissent l'intégrité du circuit à tester. Tout comme les circuits intégrés, ces techniques d'analyse de défaillance se sont complexifiées. Elles doivent permettre la détection, l'identification et localisation des défauts, l'analyse et l'extraction d'indicateurs précoces de fiabilité. Elles doivent contourner les différents verrous technologiques liés à l'évolution incessante des technologies aussi bien en fabrication des circuits intégrés qu'en assemblage et encapsulation, comme par exemple la réduction des dimensions des zones actives, l'emploi de technologies à multiniveaux de métallisation, l'utilisation de boîtier flip-chip ou BGA, l'utilisation de substrats fortement dopés...

En ce qui concerne le circuit intégré lui-même, les principales techniques d'analyse sans contact s'appuient sur la détection de points chauds (thermographie IR, thermographie laser, cristaux liquides...), la microscopie électronique à contraste de potentiel, la microscopie à émission de lumière (EMMI). La mise à disposition de sources laser compactes et polyvalentes (source continues ou impulsionsnelles, gammes d'énergie et de longueur d'onde variées...) a induit le développement récent de nouvelles techniques invasives et non destructives basées sur la stimulation laser thermique (OBIRCH, TIVA,

SEI...) ou la stimulation photoélectrique laser (OBIC, LIVA, SCOBIC...), dont certaines ont été appliquées avec succès et ont fait l'objet d'opérations de transfert technologique.

Ces techniques sans contact par excitation laser semblent particulièrement indiquées à l'analyse des circuits intégrés de haute fiabilité par rapport à des profils de missions spécifiques. Citons par exemple, l'emploi de lasers pulsés à impulsions ultra-courtes pour simuler expérimentalement les effets des radiations ionisantes sur les circuits intégrés fonctionnant dans des environnements radiatifs sévères (applications spatiales ou nucléaires). Le laser apparaît dans ce cas comme un outil complémentaire aux accélérateurs de particules qui fournit des indicateurs relatifs à la sensibilité des circuits intégrés.

En ce qui concerne les technologies d'assemblage, des techniques sans contact de localisation de défauts, notamment dans les joints de brasure ont été développées avec succès. Citons suivant leurs degrés de maturité croissant la réflectométrie laser, la microscopie acoustique et la laminographie à rayons X.

3/ Méthodologie de fiabilité

Depuis une dizaine d'années, il apparaît qu'un des facteurs majeurs conditionnant le développement de la microélectronique est la fiabilité des composants, des circuits intégrés et des assemblages, MCM ou cartes montées en surface. Il en est de même pour les microsystèmes dont le développement est conditionné par la démonstration d'une fiabilité opérationnelle satisfaisante. Des niveaux de fiabilité extrêmement élevés, entre 10 et 1 FITs (1FIT correspond à une défaillance sur 10^9 heures) exigés dans la plupart des applications industrielles, alors que dans le même temps, les profils de mission des circuits microélectroniques deviennent de plus en plus sévères du fait de leur présence dans la quasi totalité des secteurs d'activités.

Cette exigence et la complexité croissante des technologies d'intégration nécessitent un renouvellement radical des méthodes de construction et de démonstration de la fiabilité. Les bases de la haute fiabilité se situent en effet au niveau des choix technologiques, de la maîtrise des procédés, et de la modélisation physique des mécanismes de défaillance, un des objectifs étant de garantir des distributions de défaillance aussi resserrées que possible en fin de durée de vie.

Les très faibles taux de défaillance, et dans une certaine mesure les très longues durées de vie atteintes par les composants actuels rendent très difficile, voire impossible, l'évaluation expérimentale des caractéristiques usuellement données pour caractériser la fiabilité : durée de vie moyenne, ou médiane, taux de défaillance. Les classiques tests de vieillissement accélérés sous contraintes trouvent leurs limites dans le compromis entre la durée du test, le nombre de pièces sous test, et un facteur d'accélération raisonnable : il est exceptionnel d'obtenir une distribution complète (ou quasi-complète) des instants de défaillance, à des coûts non prohibitifs.

L'objectif des travaux envisagés est de jeter les bases d'une méthodologie de prévision de fiabilité basée sur une approche physique.

Outils statistiques :

Des outils statistiques peuvent être mis à profit pour estimer les paramètres intéressants, à partir d'informations expérimentales minimales couramment issues de tests tronqués en durée, et (ou) à faible population. Ces outils interviennent à plusieurs niveaux dans la démarche de démonstration de fiabilité :

- estimation optimale des paramètres fondamentaux issus d'expérience
- extrapolation fiable dans le temps, grâce à une loi analytique
- éventuellement reconstitution artificielle d'une distribution des durées de vie

La puissance actuelle des calculateurs numériques permet la mise en œuvre de « simulateurs », dans le domaine de la fiabilité comme dans d'autres domaines, lorsque la prévision purement analytique est impossible, soit par la complexité propre des lois d'extrapolation, soit par le nombre de variables envisagées. En particulier, la méthode de Monte Carlo, permet la génération empirique de la distribution d'une variable aléatoire, par balayage numérique de la variable à caractériser lorsque les paramètres décrivent leur propre distribution. Sous réserve d'un nombre de points simulés suffisant, on peut construire une fonction de répartition fiable de cette variable aléatoire.

Test de démonstration de fiabilité :

La recherche de lois de dégradation paramétrées devra être représentative des comportements à l'échelle des microstructures. L'utilisation conjointe de simulations physiques (par exemple par éléments finis) qui rend possible la prise en compte d'effets locaux, permet d'envisager des tests de **fiabilité génériques à plusieurs configurations différentes** (telles que variations de géométrie, variations dans l'utilisation des matériaux, profils de mission différents...). Une telle avancée permet de considérer la potentialité de qualification de composants par famille technologique et non plus par produit spécifique. Le gain en temps et en coût de ce type de qualification « assistée » apparaît clairement. Une autre piste pour alléger les tests de démonstration et de fiabilité est la recherche **d'indicateurs de fiabilité** instantanés ou précoces ; ce type de résultat est particulièrement attendu pour valoriser et améliorer l'efficacité des techniques Wafer Level Reliability (WLR) mises en place dans la plupart des chaînes de fabrication de circuits intégrés.

Modélisation des distributions de durée de vie

L'identification des paramètres sensibles dans un premier temps et l'introduction des distributions des paramètres SPC (Statistic Process Control) permettent d'envisager une **modélisation réaliste des distributions de défaillances**. L'impact d'un tel traitement, en remplacement de l'utilisation de paramètres fixes, permet de passer du concept de durée moyenne de vie à celui de distributions de durée de vie. Ceci est particulièrement intéressant pour analyser l'impact de la dispersion de paramètres technologiques sur la fiabilité avec bien entendu comme objectif pour les technologues de réduire au maximum cette dispersion. Il devient possible d'alors d'envisager pour un profil de mission donné la détermination d'une durée de vie spécifique avec un taux de défaillance « minimal ».

Optimisation des conditions de fonctionnement pour une fiabilité optimale

Ce thème concerne l'étude de l'impact d'une optimisation des conditions de fonctionnement (polarisation, courant, temps de charges, régimes transitoires, etc) sur la vitesse d'évolution de mécanismes de dégradation intrinsèque. Cette stratégie qui est utilisée depuis longtemps en électronique de puissance peut être étendue à d'autres composants, en particulier les EEPROM. La relation avec la conception sur ce sujet est très forte.

4/ Résultats attendus de l'action spécifique Les objectifs que se fixe cette action spécifique en coordination avec tous les acteurs peuvent se résumer ainsi :

Techniques d'analyse :

Les principaux objectifs comprennent outre le recensement des différentes techniques, des groupes de recherches concernés et l'identification de leur cadre d'application :

- l'évaluation des besoins et des adaptations futures (comme par exemple la transposition de l'ensemble de ces techniques au test par la face arrière des circuits intégrés VLSI),
- l'analyse des possibilités d'appliquer les techniques laser sur des structures sub-microniques et en particulier de contourner la principale limitation liée à la taille minimale du faisceau laser (de l'ordre de la longueur d'onde laser),
- l'étude de l'émergence de nouvelles techniques (technique SQUEED pour la détection de champ magnétique, PICA ou picosecond imaging pour la microscopie à émission de lumière dynamique, la stimulation laser dynamique, la stimulation laser non linéaire...),
- l'adaptation de ces techniques aux nanosystèmes, aux MEMS (microscopie ultrasonore, techniques laser pompe-sonde, imagerie terahertz...).

Méthodologie, fiabilité

Cette partie de l'action portera sur 5 points essentiels :

- Indicateurs de fiabilité
- Outils statistiques avancés
- Optimisation fonctionnelle
- Test générique
- Modélisation de distribution de durée de vie

Dans tous les cas il s'agira de produire un document de synthèse sur chaque sujet accompagné d'une application sur un cas concret, ces exemples pourront concerner les technologies intégrées ainsi que les domaines du packaging et de l'assemblage. Etant donné le rapport étroit de ce sujet avec les lignes de fabrication, une coopération étroite avec les industriels de la microélectronique sera mise place.

5/ Equipes partenaires recensées en début de projet

IXL,	Groupe Fiabilité et Groupe Conception, UMR5818, Université Bordeaux 1,
IETR,	Groupe de Microélectronique, UMR 6164 Université de Rennes 1,
IMEP,	Groupe fiabilité composants intégrés, UMR 5130, INPGrenoble
TIMA,	Groupe Conception pour la Fiabilité, IMAG, INPGrenoble,
LUSAC,	EA 2607, Ecole d'Ingénieur de Cherbourg, Université de Caen
L2MP,	Laboratoire Matériaux et Microélectronique de Provence, UMR CNRS 6137, Université de Provence
IEMN,	Equipe Fiabilité des composants, Lille
LAAS	Toulouse

Partenaires industriels

CNES (Toulouse)
ONERA (Toulouse)
STMicroelectronics, Rennes

6/ Financement Le financement demandé doit permettre aux différents acteurs de tenir le programme d'action proposé. Il faudra qu'ils participent aux différentes réunions de coordination, aux séminaires, à l'édition de documents destinés au site commun du réseau, à financer éventuellement des stagiaires pour la constitution de produits Internet (base de connaissance et guide de fiabilité sur le site du RTP Fiab). Sachant que ce réseau peut impliquer une douzaine d'équipes (mentionnées ci-dessus), il faudra pouvoir réunir plusieurs fois en différents point du territoire, comme suggéré, 30 à 40 participants. Un travail important sera donné au coordinateur de cette action qui devra être directement lié au coordinateur du réseau thématique. Un montant global de 35.000€ est demandé dont 5.000€ peuvent être réservés au coordinateur et 30.000€ à répartir entre les différents acteurs avec une modulation éventuelle en fonction du niveau d'implication.

7/ Coordinateur

Olivier BONNAUD, Professeur
Groupe de Microélectronique de
L'Institut d'Electronique et Télécommunications de Rennes
IETR UMR 6164 – Campus de Beaulieu
Université de Rennes1 35042 RENNES Cedex
Tél : 02 23 23 60 71 Fax : 02 23 23 56 57
Mèl : olivier.bonnaud@univ-rennes1.fr

Dean LEWIS, Maître de Conférences
Groupe de conception et test
Laboratoire IXL-UMR5818
ENSEIRB-Université Bordeaux 1, 33405 TALENCE CEDEX
Tél : 05 56 84 27 64 Fax : 02 23 23 56 57
Mèl : lewis@ixl.u-bordeaux.fr