

# ANALYSE DE PROPAGATION DE FISSURES LE LONG D'INTERFACES ALTERNÉES FORTES-FAIBLES : APPLICATION AUX STRUCTURES *CRACK-STOP* DE LA MICROÉLECTRONIQUE

Idir Raid <sup>a,b</sup>, Rafael Estevez <sup>a</sup>, Sébastien Gallois-Garreignot <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, SIMaP, 38000 Grenoble, France

<sup>b</sup> STMicroelectronics, 850 rue Jean Monnet, 38926 Crolles Cedex, France

idir.raid@st.com

**Mots-clés :** délaminage, films minces, interfaces hétérogènes, micropuce, *crack-stop*.

## Résumé

Sous les conditions de l'approximation par 'small-scale yielding', une étude a été menée afin de déterminer l'influence de l'hétérogénéité d'une interface sur son taux de restitution d'énergie critique. La structure étudiée est celle du « *crack-stop* » d'une micropuce, de plus en plus mécaniquement sollicitée étant donnée la miniaturisation de plus en plus importante en microrélectronique. Afin de préserver son intégrité, une « barrière » mécanique, que nous étudions, est disposée tout autour de la puce.

## 1 Introduction

Le circuit intégré, Figure 1, ou plus communément appelé puce en référence à sa partie active, est un produit de la microélectronique qui nécessite des centaines d'étapes lors du procédé de fabrication *dual-Damascene* décrit dans [1]. Il est composé d'un boîtier, passif, qui sert de lien entre sa partie active et un plus gros circuit, le circuit imprimé. Ladite puce consiste en un bloc de silicium, matériau à la base de sa conception, des couches de films minces isolants et d'une circuiterie métallique complexe conductrice.

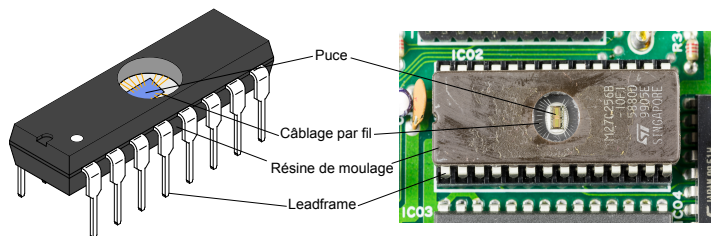


FIGURE 1 – Illustration des composants d'un circuit intégré monté sur un circuit imprimé.

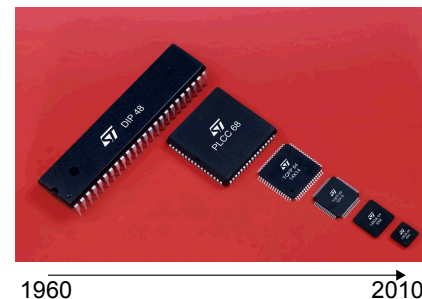
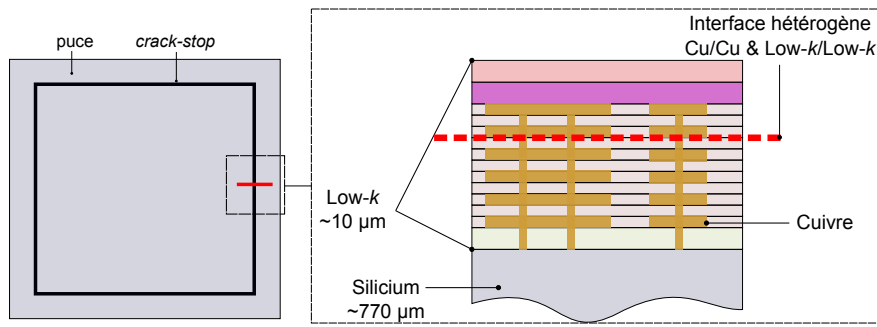


FIGURE 2 – Evolution de la taille des circuits intégrés chez STMicroelectronics.

Or, motivée par une optimisation des performances à moindre coût, la tendance dans l'industrie microélectronique est à la miniaturisation, Figure 2. Les films déposés étant de plus en plus minces, les problèmes liés à des effets de capacités parasites forcent l'introduction de matériaux aux capacités d'isolation de plus en plus grandes, mais aux propriétés mécaniques « sacrifiées » [2]. Ces matériaux, très poreux, sont appelés *low- $\kappa$* , car ils possèdent une très faible constante diélectrique, ou permittivité relative,  $\kappa$ , comprise entre 2 et 4.

L'ensemble de ces phénomènes de miniaturisation, l'introduction des *low- $\kappa$*  et des procédés de fabrication de plus en plus complexes, est un facteur de génération et de propagation de défauts mécaniques au niveau de la micro-puce. En résulte alors un intérêt pour les structures de type *crack-stop*, Figure 3, qui sont embarquées sur le pourtour de la puce, afin de la protéger contre l'intrusion de micro-fissures, de l'humidité et de toute agression extérieure. Cette étude a pour but de développer des méthodes de caractérisation et d'optimisation de telles structures.

FIGURE 3 – Illustration d'une puce, et vue en coupe de sa structure *crack-stop*.

## 2 Étude de la résistance à la rupture d'une interface homogène

Dans les produits de la microélectronique les plus avancés, les épaisseurs des lignes de cuivre ne dépassent pas 50nm dans les niveaux à la teneur mécanique la plus faible, et donc où une fissure est susceptible de se propager. Il apparaît donc difficile de recourir aux tests mécaniques habituels (FPB, DCB, ENF, ...) <sup>1</sup> afin de mesurer les énergies d'adhésion des différentes interfaces.

Ceci dit, le silicium sur lequel les dépôts sont effectués est épais de plusieurs centaines de microns, 750µm environ, tandis que l'épaisseur des zones hétérogènes, sujettes à des phénomènes de fissuration, est très inférieur à ce dernier. Il est donc possible de poser l'hypothèse selon laquelle tout phénomène plastique est contenu à la zone plastique en front de fissure. Sous ces conditions dites, de *small-scale yielding* (SSY) [3], le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  suffit à décrire les champs de déplacement autour du front de fissure, sous chargement en mode I, par :

$$u_i(r, \vartheta) = \frac{K_I}{2G_i} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} f_i(\vartheta), i = \{x, y\} \quad (1)$$

où  $G_i$  est le module de cisaillement du matériau environnant.  $K_I$  peut être relié au taux de restitution d'énergie  $G$ , en déformations planes, par :

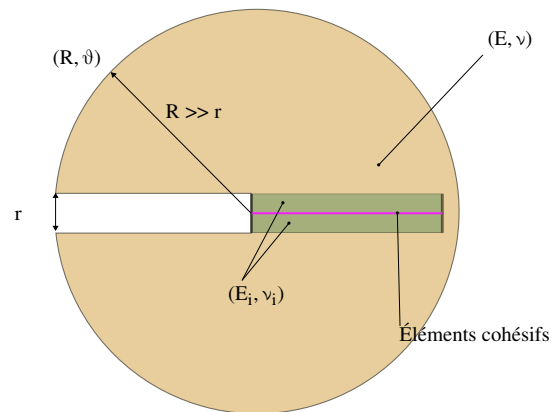
$$G = \frac{(1 - \nu^2)K^2}{E} \quad (2)$$

où  $(E, \nu)$  sont les propriétés mécaniques du matériau élastique englobant la zone fissurée, Figure 4.

Dans un premier temps, ne sont considérées que les interfaces cuivre sur cuivre (Cu/Cu) et low- $\kappa$  sur low- $\kappa$  ( $l\kappa/l\kappa$ ). Les propriétés suivantes sont utilisées dans le modèle décrit précédemment :  $E = 169\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.29$  pour représenter le Silicium, matériau élastique linéaire englobant la zone non-linéaire qu'est la fissure,  $E_{\text{Cu}} = 128\text{GPa}$ ,  $\nu_{\text{Cu}} = 0.33$  pour le cuivre et  $E_{l\kappa} = 7.8\text{GPa}$ ,  $\nu_{l\kappa} = 0.25$  pour le low- $\kappa$ . Quant aux dimensions du problème,  $R = 1000\mu\text{m}$  et  $r = 1\text{nm}$ . La demi-épaisseur du cuivre, respectivement du low- $\kappa$ , est de  $h = 50\text{nm}$ .

Afin de modéliser le délaminage, des éléments cohésifs [4] régis par une loi traction-séparation triangulaire sont introduits. Les paramètres choisis sont tels que les énergies d'adhésion sont de  $15\text{J/m}^2$  et  $2\text{J/m}^2$  respectivement, pour les interfaces (Cu/Cu) et ( $l\kappa/l\kappa$ ) [5]. À une ouverture  $\delta_{\text{max}}$  fixée à 30nm, la contrainte maximale  $\sigma_{\text{max}}$  vaut 1000MPa pour le cuivre et 133MPa pour le low- $\kappa$ , Figure 5.

La Figure 6 contient les courbes de résistance tracées afin de vérifier la validité des hypothèses proposées [6, 7].

FIGURE 4 – Schématisation du modèle d'étude de propagation de fissure dans un milieu homogène, sous conditions de *small-scale yielding*.

1. Four-Point Bending, Double Cantilever Beam, End Notched Flexure.

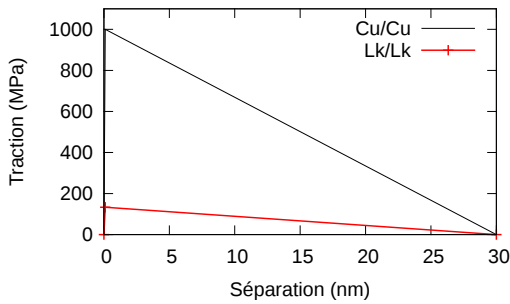


FIGURE 5 – Lois de traction-séparation gouvernant les éléments cohésifs aux interfaces respectives du cuivre et du low- $\chi$

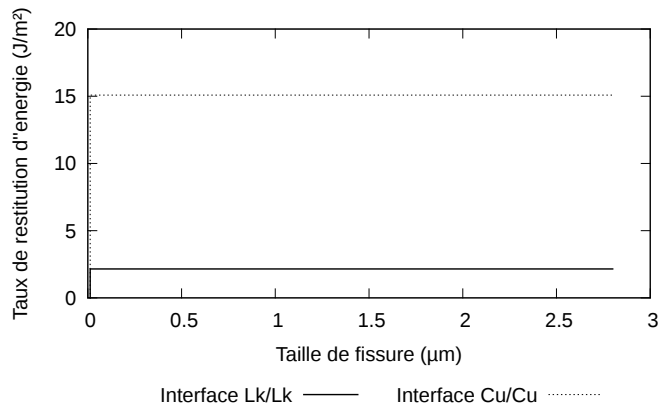


FIGURE 6 – Courbes de résistance dans le cas de propagation de fissure en milieu homogène.

Les taux de restitution d'énergie mesurés correspondent bien aux propriétés des interfaces Cu/cu et l $\chi$ /l $\chi$  mises en données. Le plateau est caractéristique d'une rupture fragile.

### 3 Application au cas de l'interface hétérogène

Le modèle de propagation de fissure en milieu homogène sous conditions SSY ayant été validé, il est désormais possible d'étudier ce phénomène dans les cas d'interfaces hétérogènes. Afin de quantifier la tenue à la rupture d'une structure *crack-stop*, n'ont été modélisés que les niveaux de métaux entre lesquels la fissure se propage, Figure 7. La densité surfacique de l'interface forte  $d$  a été variée de 0% à 100%. Les énergies d'adhésion sont celles des interfaces étudiées précédemment, et valent respectivement  $G_F = 15\text{J/m}^2$  et  $G_f = 2\text{J/m}^2$ . Les courbes de résistances obtenues sont tracées Figure 8 et les valeurs des taux de restitution d'énergie reportées sur le graphe Figure 9.

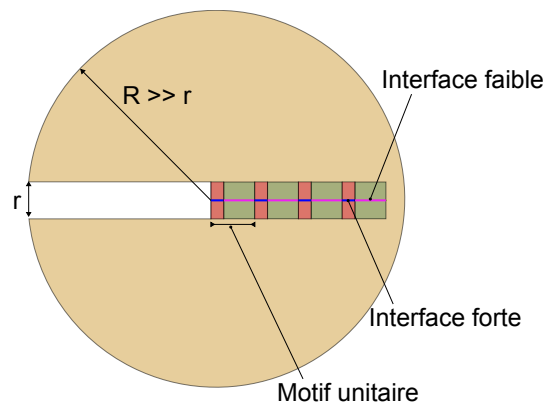


FIGURE 7 – Modèle avec interface hétérogène.

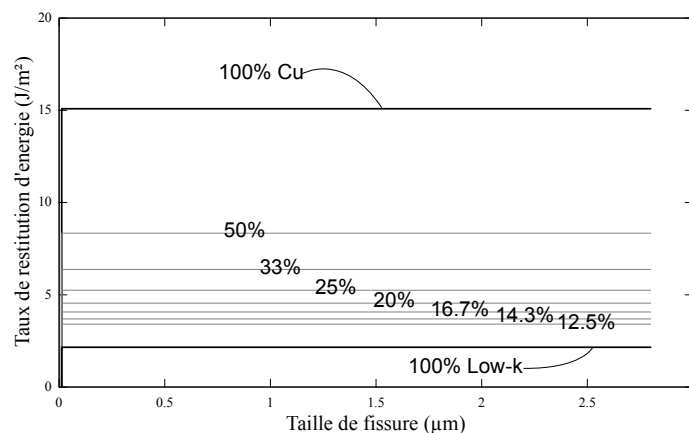


FIGURE 8 – Courbes de résistance à des interfaces aux différentes densités de cuivre.

Les résultats montrent que le taux de restitution d'énergie effectif résultant,  $G_{\text{eff}}$ , dépend essentiellement de la densité de cuivre, et ce pour différentes lois de traction-séparation choisies pour modéliser le comportement des éléments cohésifs (triangulaire et exponentielle).

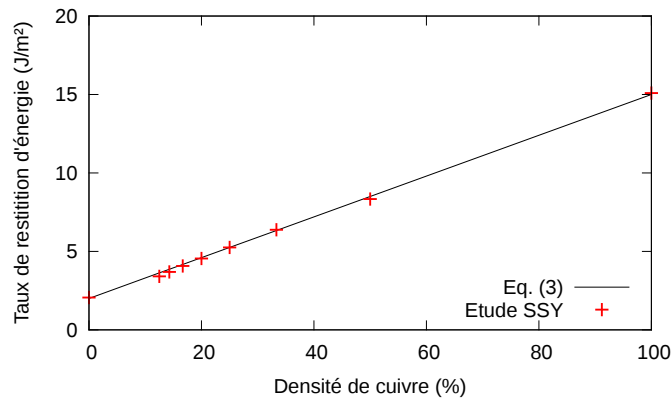


FIGURE 9 – Comparaison des résultats de la simulation à l'Equation (3)

Sur la Figure 9, les résultats de l'étude sont comparés à une moyenne pondérée par les densités surfaciques :

$$G_{\text{eff}} = dG_F + (1 - d)G_F. \quad (3)$$

Il a en effet été trouvé que, sous les hypothèses actuelles de l'étude, le comportement d'une structure hétérogène, quant à son taux de restitution d'énergie, est dicté par une « loi des mélanges ». Ce même résultat a aussi été observé expérimentalement par Tadepalli *et al.* dans [8], mais sur des structures d'épaisseurs plus importantes. Afin de mieux représenter la structure réelle du *crack-stop*, une analyse 3D a cependant aussi été menée. Le motif est représenté Figure 10.

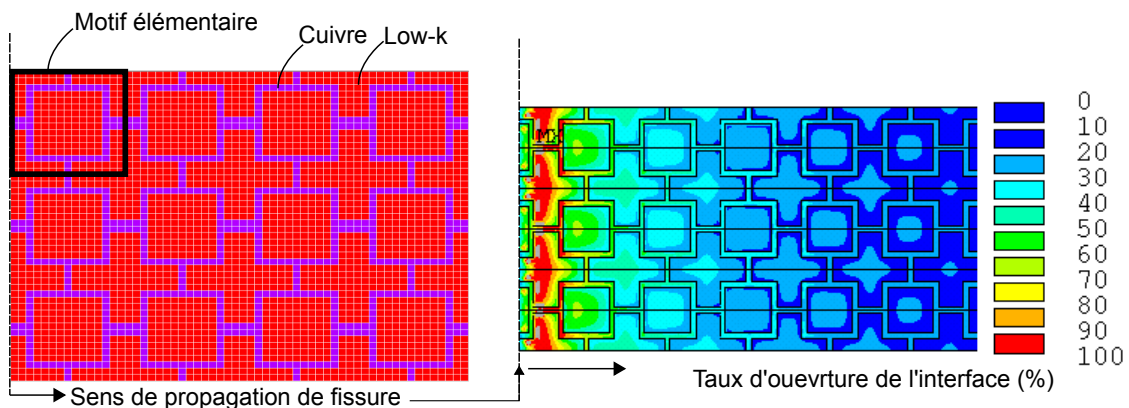


FIGURE 10 – Zoom sur une hétérogénéité d'une structure *crack-stop*

La densité moyenne de cuivre, et donc de l'interface forte, est d'environ 20%, comme présenté sur le motif élémentaire Figure 10. Le taux de restitution d'énergie mesuré vaut  $4.65 \text{ J/m}^2$ . Si l'on se réfère à la Figure 9, il s'agit de la même valeur que pour le cas bi-dimensionnel avec une densité de cuivre à 20%. Malgré l'effet tri-dimensionnel de la structure et la tortuosité apparente du front de fissure, l'énergie d'adhésion effective relevée obéit aussi à une moyenne pondérée par la densité surfacique des interfaces considérées.

## 4 Conclusion

Dans une optique de caractérisation de la tenue à la rupture de structures *crack-stop*, les modèles bi- et tri-dimensionnels ont été développés sous des conditions de SSY. Dans un premier temps, une analyse sous ces conditions, aux conditions limites à  $K_I$  dominant, a été menée afin de valider le modèle pour l'étude de propagation de fissure dans un milieu homogène. L'étude a ensuite porté sur le cas de l'interface hétérogène, où la densité du cuivre a été variée. Les résultats ont montré que le taux de restitution d'énergie est pondéré par la densité surfacique de chaque interface. La même observation est faite sur un cas tri-dimensionnel, proche de la structure réelle des *crack-stops*.

Ceci dit, l'effet de la dissipation plastique du cuivre n'a pas été considéré. Il fait l'état d'une étude en cours, dans le périmètre des travaux de Tvergaard et Hutchinson dans [9].

## Références

- [1] C. W. KAANTA et al. "Dual damascene : A ULSI wiring technology". In : *VLSI Multilevel Interconnection Conference, 1991, Proceedings., Eighth International IEEE*. IEEE. 1991, p. 144–152.
- [2] Z. LI et al. "Mechanical and dielectric properties of pure-silica-zeolite low-k materials". In : *Angewandte Chemie* 118.38 (2006), p. 6477–6480.
- [3] N. LEVY et al. "Small scale yielding near a crack in plane strain : a finite element analysis". In : *International Journal of Fracture Mechanics* 7.2 (1971), p. 143–156.
- [4] E SMITH. "The structure in the vicinity of a crack tip : a general theory based on the cohesive zone model". In : *Engineering Fracture Mechanics* 6.2 (1974), p. 213–222.
- [5] B. VAN HAL et al. "Cohesive zone modeling for structural integrity analysis of IC interconnects". In : *Microelectronics Reliability* 47.8 (2007), p. 1251–1261.
- [6] A. W. THOMPSON et J. F. KNOTT. "Micromechanisms of brittle fracture". In : *Metallurgical Transactions A* 24.3 (1993), p. 523–534.
- [7] B. R. LAWN, B. J. HOCKEY et H RICHTER. "Indentation analysis : applications in the strength and wear of brittle materials". In : *Journal of Microscopy* 130.3 (1983), p. 295–308.
- [8] R. TADEPALLI, K. T. TURNER et C. V. THOMPSON. "Effects of patterning on the interface toughness of wafer-level Cu–Cu bonds". In : *Acta Materialia* 56.3 (2008), p. 438–447.
- [9] V. TVERGAARD et J. W. HUTCHINSON. "Analyses of crack growth along interface of patterned wafer-level Cu–Cu bonds". In : *International Journal of Solids and Structures* 46.18-19 (2009), p. 3433–3440.