



HAL
open science

Étude de la résistance électrique d'un contact Au /Au en fonction de la force appliquée

Pierre-Yves Duvivier, Vincent Mandrillon, jean-Philippe Polizzi, Karim Inal

► To cite this version:

Pierre-Yves Duvivier, Vincent Mandrillon, jean-Philippe Polizzi, Karim Inal. Étude de la résistance électrique d'un contact Au /Au en fonction de la force appliquée. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391432>

HAL Id: hal-03391432

<https://hal.science/hal-03391432v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Étude de la résistance électrique d'un contact Au /Au en fonction de la force appliquée

P.-Y. DUVIVIER^{a,b}, V. MANDRILLON^a, J.-P. POLIZZI^a, K. INAL^b

a. CEA, LETI, MINATEC, F38054 Grenoble, France

b. ENSM-SE/CMP, département PS2, 880 avenue de Mimet, 13541 Gardanne

Résumé :

Afin d'étudier l'effet d'une pression mécanique variable sur le contact électrique, un dispositif expérimental dédié a été mis au point. La résistance électrique de contact y est mesurée entre deux barreaux cylindriques croisés recouverts d'un film mince d'or. En dessous d'une centaine de mN, elle augmente rapidement lorsque la force de contact diminue. Un modèle de contact rugueux permet de rendre compte de cet effet de manière satisfaisante.

Abstract :

In order to study the effect of a variable mechanical pressure on the electrical contact, an experimental device has been developed. The electrical contact resistance is measured between two crossed rods coated with a gold thin film. Below a hundred of mN, it increases rapidly as applied load decreases. A rough contact model allows rendering this effect satisfactorily.

Mots clefs : contact, constriction électrique, résistance électrique, rugosité, Au, micro-relais.

1 Introduction

L'étude du contact électrique dans les micro-relais (microswitches) est de première importance pour leur performance. Ce contact correspond généralement à des efforts de 50 à 500 μ N appliqués entre des structures hémisphériques conductrices (bumps) dont les rayons de courbure s'échelonnent de 10 à 300 μ m et un plan conducteur. Le matériau de contact généralement employé dans les microsystèmes est l'or, en particulier grâce à sa faible résistivité électrique, sa résistance à l'oxydation et à la corrosion ou encore grâce à sa facilité de dépôt avec les procédés de la microélectronique [1]. Il est cependant à l'origine de défaillances, notamment par collage [2]. L'emploi d'autres matériaux de contact doit être examiné mais le temps de réalisation d'un nouveau micro-relais fonctionnel est long (plusieurs mois). La mise au point d'un véhicule de test rapide à mettre en œuvre s'avère donc nécessaire. Une solution simple à ce besoin est la mesure de résistance électrique de contact entre barreaux croisés conducteurs, réalisés avec les matériaux désirés et permettant une définition géométrique propre et reproductible du point de contact [3]. L'objectif de cet article consiste donc à présenter le dispositif expérimental utilisé et à analyser les premiers résultats obtenus avec des barreaux cylindriques de silice recouverts d'un film mince d'or.

2 Dispositif expérimental

Les échantillons utilisés sont des lentilles optiques cylindriques en silice de rayon 3,5mm, recouvertes d'une couche mince d'or déposée par pulvérisation cathodique. Le film, d'une épaisseur de 1 μ m, permet d'obtenir un état de surface similaire à celui des zones de contact des micro-relais. Une couche d'accroche en titane de 20nm est utilisée. Son influence mécanique et électrique est supposée négligeable dans la suite de l'étude. Le module d'Young et la dureté du film mince sont déterminés expérimentalement au moyen d'un NanoIndenter XP de MTS muni du module DCM (une tête de mesure dédiée aux très faibles enfoncements), en mode CSM (Continuous Stiffness Measurement) [4]. Le module d'Young E du film mince vaut 85GPa et sa dureté H est de 1GPa.

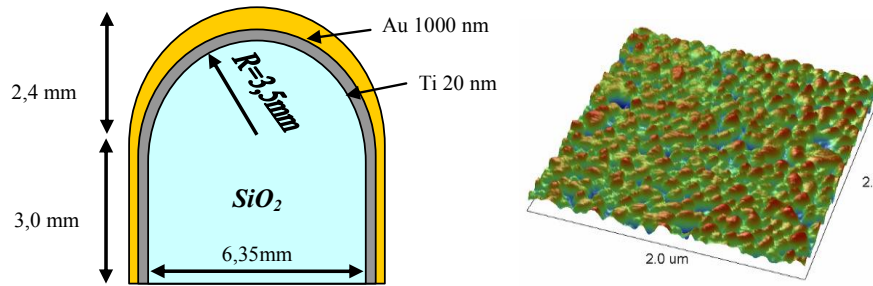


Fig. 1 – Vue en coupe schématique d'un barreau (a) et sa topographie observée à l'AFM (b).

L'observation de la surface s'effectue dans un premier temps avec un interféromètre optique pour vérifier le rayon de courbure R des barreaux. R est ainsi évalué à 3,520mm. Un AFM (microscope à force atomique) est ensuite utilisé pour caractériser la rugosité de surface en mode contact avec une force de 35nN. L'image obtenue est présentée fig. 1 (b) et montre la présence d'aspérités de quelques nm de hauteur et d'une centaine de nm de diamètre, représentatives de la microstructure du film mince. La résistivité ρ de $2,3 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \mu\text{m}$ de la couche mince d'or est déterminée par mesure 4 points directement sur le barreau [5].

Le dispositif utilisé pour mettre en contact les échantillons est présenté figure 2.

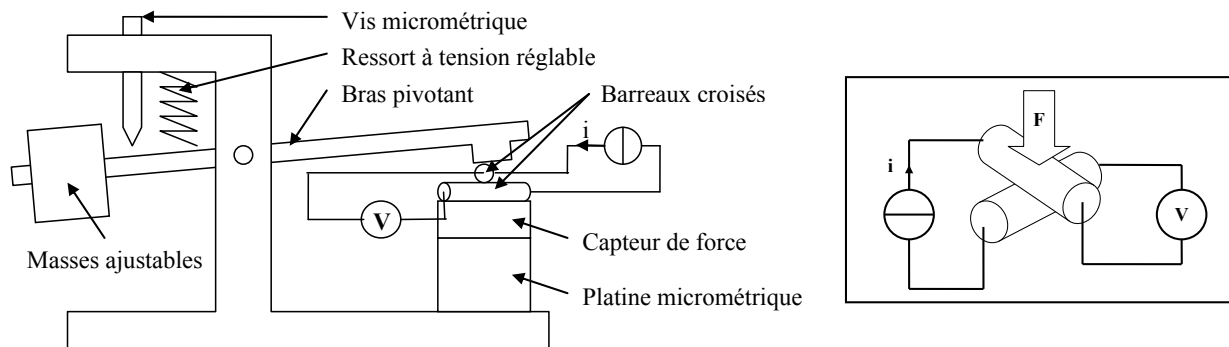


Fig. 2 – Schémas de principe de la balance de précision.

Il fonctionne suivant le principe inverse d'une balance romaine : la rotation du bras engendre le contact entre les deux barreaux à tester, la mise en contact étant réalisée progressivement à l'aide d'une vis micrométrique retenant le bras. La charge, allant de 5mN à 4N, est préréglée à l'aide de masses ajustables et du ressort. La platine micrométrique est utilisée pour changer de zone de contact entre les essais rendant ainsi possible la réalisation de plusieurs mesures sur un même couple d'échantillons.

Les barreaux sont intégrés au circuit électrique de mesure par l'intermédiaire de fils électriques fins monobrins maintenus par de la colle époxy. De la laque d'argent est utilisée pour assurer la continuité électrique du contact entre le fil et le barreau. Les mesures électriques sont effectuées selon la méthode 4 fils qui consiste à séparer le circuit d'injection du courant de celui de mesure permettant ainsi de s'affranchir des résistances parasites des fils (figure 2). Les forces électromotrices de contact sont éliminées par moyenne des tensions correspondant à des mesures consécutives sous deux courants de même valeur mais de polarité opposée [6]. Toutes les mesures de résistance de contact sont effectuées sur une zone de contact vierge avec un courant injecté de 10mA.

Pour utiliser correctement la balance, il est nécessaire de savoir dans quelle mesure les expériences réalisées représentent le contact sphère (bump) / plan d'un éventuel micro-relais. La pression moyenne P_{moyenne} pour un contact sphérique en déformation élastique est donnée par le modèle de Hertz [7] :

$$P_{\text{moyenne}} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{F}{R^2} \right)^{1/3} \left(\frac{4}{3} E^* \right)^{2/3} = \frac{2}{3} P_{\text{max}} \quad (1)$$

où F est la force appliquée, R le rayon de courbure réduit et E^* le module d'Young réduit. Ainsi, pour une même pression moyenne P_{moyenne} (ou maximale P_{max}), on obtient la relation suivante reliant le point de fonctionnement de la balance aux couples correspondants d'un micro-relais ($F_{\mu\text{-relais}}, R_{\text{bump}}$) :

$$F_{\mu\text{-relais}} = \left(\frac{R_{\text{bump}}}{R_{\text{cylindre}}} \right)^2 \left(\frac{E_{\text{Silice}}}{E_{\text{Au}}} \right)^2 F_{\text{balance}} \quad (2)$$

Cette relation est représentée figure 3(a) avec $E_{\text{Silice}}=100\text{GPa}$, pour les valeurs de forces accessibles avec la balance (en bleu) et comparée à la zone intéressante pour les micro-relais (en pointillés rouges).

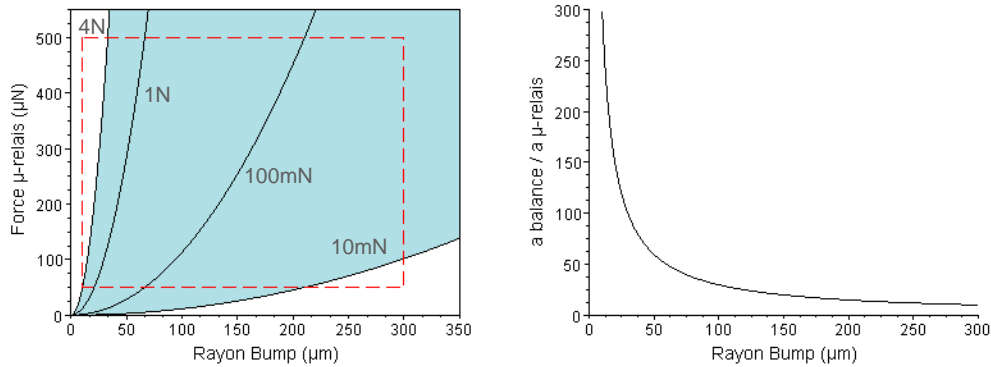


Fig. 3 – (a) Couples $(F_{\mu\text{-relais}}, R_{\text{bump}})$ associés à une force de contact avec la balance.
(b) Rapport des rayons de contact $a_{\text{balance}} / a_{\mu\text{-relais}}$ en fonction du rayon de courbure du bump R_{bump} .

Cependant, le contact d'un micro relais représenté par une expérience réalisée avec la balance en diffère par un rayon de contact plus grand. En effet quelle que soit la force appliquée, le rapport du rayon de contact entre barreaux croisés sur le rayon de contact du bump correspondant est constant et vaut :

$$\frac{a_{\text{balance}}}{a_{\mu\text{-relais}}} = \frac{R_{\text{balance}} E_{\text{Au}}}{R_{\text{bump}} E_{\text{Silice}}} \quad (3)$$

Soit un rapport des rayons de contact allant de 8 à 240 selon le rayon de courbure du contact du micro relais représenté.

3 Résultats expérimentaux et analyse

Les mesures de résistance de contact ont été réalisées pour des forces de 5, 10, 50, 100, 500, 1000, 1500, 2000 et 4000mN. Les résultats sont présentés figure 4. Une décroissance de la résistance de contact avec la force appliquée est observée avec des valeurs allant de 76mΩ sous 5mN à 30mΩ sous 4N.

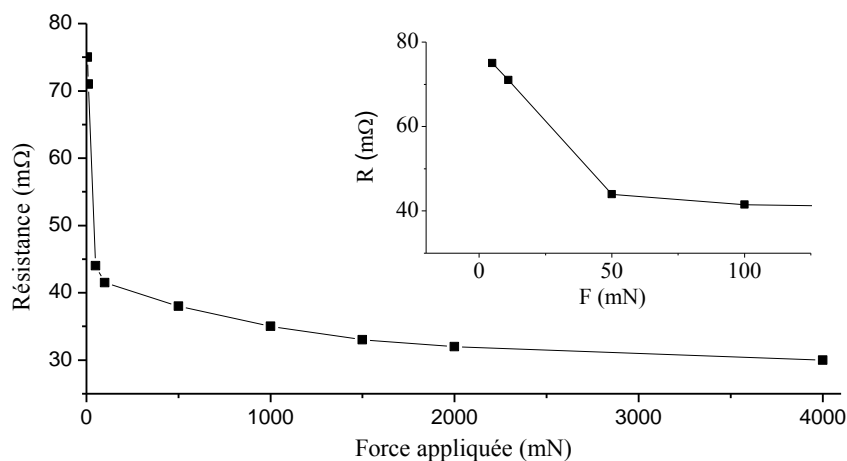


Fig. 4 – Evolution de la résistance du contact Au/Au en fonction de la force appliquée sous 10mA.

Dans le cas du contact rugueux, le contact réel ne s'effectue généralement pas sur toute la surface apparente du contact mais seulement en certains points. Le nombre et la taille de ces points de contact dépendent de plusieurs facteurs comme la force appliquée, la forme macroscopique des surfaces en regard, leur structure microscopique ou encore les propriétés mécaniques des matériaux impliqués. Une analyse plus fine des

résultats nécessite donc la connaissance de la répartition en hauteur des aspérités et de leur rayon de courbure [8, 9, 10]. Dans ce but, un programme de traitement d'image, permettant de dénombrer les aspérités présentes sur une image AFM et de déterminer pour chacune d'elle la position et la hauteur de son sommet ainsi que son rayon de courbure, est utilisé. L'image est soumise à un traitement par convolution de type Laplacien de Gaussienne seuillé pour la détection du contour des aspérités, associé à un algorithme de comptage spécifique. Le résultat est une image binaire représentant les aspérités isolées les unes des autres et permettant leur dénombrement. Chaque aspérité identifiée est approximée par un paraboloïde à l'aide d'une méthode de minimisation par moindres carrés. Les résultats obtenus pour les films d'or utilisés avec une image AFM de 2,1 μm de coté sont illustrés figure 5.

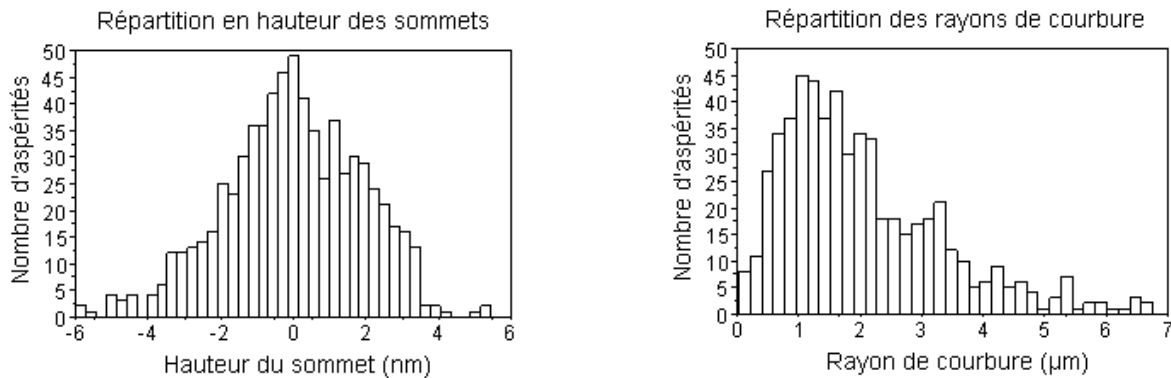


FIG. 5 – Histogrammes de répartition des hauteurs des aspérités (a) et de leurs rayons de courbure (b)

La distribution en hauteurs des aspérités peut être considérée comme Gaussienne avec un écart-type σ de 1,87nm. Soit une rugosité conjointe équivalente pour les deux surfaces de contact de $\sigma_{eq} = \sqrt{2}\sigma = 2,64\text{nm}$. Le rayon de courbure moyen des aspérités est de 2,44 μm et leur densité est de 157 aspérités par μm^2 .

Pour le contact sphère/plan, l'écart entre le rayon de contact obtenu avec le modèle de Hertz et celui calculé en prenant en compte l'influence de la rugosité de surface est déterminé par α , un paramètre sans dimension [9, 10] :

$$\alpha = \frac{\sigma_{eq}}{\delta_{Hertz}} = \frac{\sigma_{eq} R}{a_{Hertz}^2} = \sigma_{eq} \left(\frac{16RE^{*2}}{9F^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

où δ_{Hertz} et a_{Hertz} sont respectivement l'enfoncement et le rayon de la zone de contact donnés par la théorie de Hertz, σ_{eq} étant l'écart-type de la distribution des hauteurs des aspérités. Pour les valeurs de α inférieures à 0,2, l'écart par rapport à l'application directe des formules de Hertz pour le calcul du rayon de contact apparent et la répartition de pression est inférieur à 10% [9, 10]. A l'opposé, si α est grand, l'influence des aspérités est significative : la pression de contact est réduite en amplitude et distribuée sur une aire de contact plus large. Aux forces auxquelles nous travaillons, α est toujours inférieur à 0,2.

Un modèle de contact établi suivant une distribution de pression à l'interface de contact correspondant au modèle de Hertz peut donc être développé. Pour cette distribution de pression, le nombre et le diamètre des points de contact par unité de surface le long du rayon de la zone de contact apparent est calculé numériquement en utilisant le modèle de contact statistique CEB [11] de déformation élastoplastique des aspérités. Afin de rendre correctement compte du contact entre les deux surfaces d'or, le modèle est utilisé pour une population d'aspérités ayant une distribution gaussienne en hauteur dont la densité et l'écart type équivalent sont ceux déterminés précédemment par analyse d'image. Le rayon de courbure équivalent est égal à la moitié du rayon de courbure moyen mesuré. Le module d'Young et la dureté H des aspérités sont ceux déterminés par nanoindentation sur les films minces d'or. Les résultats des calculs montrent que le pourcentage d'aspérités en déformation élastique et plastique évolue peu sur toute la gamme de forces appliquées au cours de l'expérience puisque de 5mN à 4N, il passe de 62% à 41% pour la déformation élastique et de 38% à 59 % pour la déformation plastique. Quelle que soit la force appliquée, le rapport du nombre d'aspérités en déformation plastique sur le nombre d'aspérités en déformation élastique ainsi que le rayon moyen de contact sont sensiblement constants à la surface du contact apparent. Ce dernier évolue de 35nm à 45nm sur la gamme de force étudiée. La principale grandeur dont la valeur varie de manière

significative le long du rayon de contact apparent est la densité des contacts, c'est-à-dire leur espacement moyen. La figure 6 montre l'évolution du nombre de points de contact et de la surface réelle de contact avec la force appliquée. Une évolution linéaire du ratio surface réelle/surface apparente de contact est constatée. Ce comportement peut être rapproché de la relation linéaire générale reliant force et surface de contact dans les modèles statistiques de contact plan rugueux.

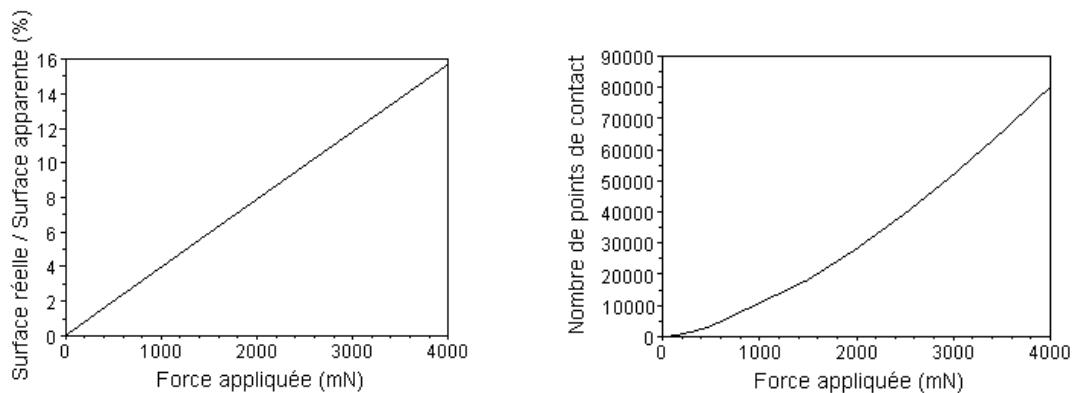


FIG. 6 – (a) Evolution du nombre de points de contacts avec la force appliquée.
(b) Evolution de la surface de contact apparente avec le force appliquée.

Ce modèle mécanique de contact est utilisé pour calculer la résistance électrique surfacique le long du rayon du contact apparent en intégrant, selon la distribution statistique des aspérités, la conductivité de chaque aspérité calculée à l'aide du modèle approché de Nikolic [12]. Ce dernier prend en compte les cas limites de Maxwell et de Sharvin [3] pour les rayons de contact dont le diamètre est de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des électrons (36nm dans l'Au). Pour ce calcul, les résistances de constriction de chaque point de contact sont supposées indépendantes les unes des autres. Ce qui est justifié par la distance moyenne calculée entre aspérités, toujours supérieure à au moins 10 fois le rayon de contact quelle que soit la force appliquée.

Il est possible d'identifier trois contributions à la résistance de contact totale mesurée par la méthode 4 fils : la résistance d'interface (résistance de constriction des point de contact), la résistance de tassement des lignes de courant (crowding) perpendiculaire au plan du film [13, 14] et la résistance d'étalement (spreading) dans le plan du film qui est présente même dans le cas d'une mesure 4 fils [15]. Les deux premières contributions correspondant à la résistance de contact intrinsèque R_C ne sont pas séparables et sont calculées à l'aide de la relation donnée par Allen dans [13] en utilisant une conductivité surfacique moyenne, constante à l'interface et égale à la valeur moyenne de la conductivité surfacique calculée à l'aide de la méthode statistique appliquée au modèle de Nikolic. La troisième contribution R_S pour la mesure 4 fils n'a pas été calculée dans ce travail mais en supposant le contact ponctuel par rapport à la taille des barreaux, elle doit être proportionnelle à la résistance carré du film d'Au (23m Ω) définie comme le rapport de la résistivité du film sur son épaisseur. Le calcul montre que pour une force de contact de 4N, R_C est négligeable devant la résistance mesurée expérimentalement. Nous en déduisons une valeur de R_S égale à 30m Ω . La figure 7 compare les résultats expérimentaux au calcul numérique pour cette valeur de R_S .

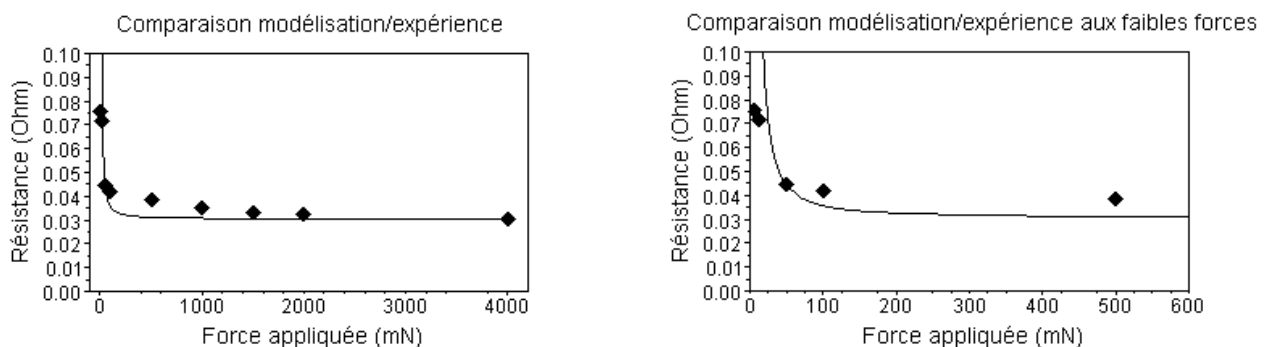


FIG. 7 – Evolution de la résistance de contact mesurée en fonction de la force appliquée. Comparaison modèle / expérience.

L'accord entre le modèle et l'expérience est satisfaisant puisque l'augmentation rapide de la résistance de contact pour les forces inférieures 50mN est bien décrite. Ce modèle pourra être amélioré en calculant explicitement R_S , en appliquant la méthode de calcul de Allen [13] à une distribution non uniforme de la conductivité due aux points de contact et en utilisant un modèle statistique plus évolué prenant en compte la probabilité de trouver deux aspérités en vis à vis [8].

4 Conclusion

Un dispositif expérimental permettant déterminer les valeurs de résistance de contact entre des barreaux cylindriques de silice de 3,5mm de rayon recouverts d'un film mince conducteur est décrit. Un abaque permettant d'établir une correspondance en pression moyenne entre les mesures réalisées avec les cylindres et un micro-relais dont le contact serait réalisé avec le même film mince est présenté. Le dispositif est utilisé pour déterminer expérimentalement la résistance de contact entre deux films minces d'or de 1 μ m d'épaisseur pour des charges allant de 5mN à 4N. Un modèle simple de contact, prenant en compte la rugosité à l'échelle microscopique, permet de rendre correctement compte de l'évolution de la résistance de contact mesurée. A l'aide de cette étude, cette méthode de mesure et d'analyse de résistance de contact peut maintenant être utilisée pour caractériser le contact électrique entre de nouveaux couples de matériaux.

References

- [1] Patton S.T. and J.S. Zabinski, Fundamental studies of Au contacts in MEMS RF switches, *Tribology Letters*, 18, 215-230, 2005.
- [2] Patton S.T. and J.S. Zabinski, Failure Mechanisms of Capacitive MEMS RF Switch Contacts, *Tribology Letters*, 19, 262-272, 2005.
- [3] Holm R., *Electric contacts: Theory and applications*, 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [4] Fischer-Cripps A.C., *Nanoindentation*, 1st ed., Springer, 2002.
- [5] Topsoe H., Geometric correction factors in four point resistivity measurement, Semiconductor division, Bulletin No. 472-13, (<http://www.four-point-probes.com/haldor.html>), 1968.
- [6] NF EN 60512-2-1, Connecteurs pour équipements électroniques.
- [7] Johnson K.L., *Contact Mechanics*, 1st ed., Cambridge University Press, 1985.
- [8] Greenwood J.A. and J.H. Tripp, The contact of two nominally flat rough surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 185, 625-633, 1971.
- [9] Greenwood J.A. and J.H. Tripp, Elastic contact of rough spheres, *Journal of Applied Mechanics*, 34, 153-159, 1967.
- [10] Greenwood J.A., Johnson K.L. and E. Matsubara, A surface roughness parameter in Hertz contact, *Wear*, 100, 47-57, 1984.
- [11] Chang W.R., Etsion I. and D.B. Bogy, An Elastic-Plastic Model for the contact of rough Surfaces, *Journal of Tribology*, 109, 257-263, 1987.
- [12] Nikolic B. and P.B. Allen, Electron transport through a circular constriction, *Physical Review B*, 60(6), 3963-3969, 1999.
- [13] Allen L.H. et al., Solution to current crowding in circular vias for contact resistance measurements, *J. Appl. Phys.*, 70(1), 253-258, 1991.
- [14] Lavers J.D, Constriction resistance at high signal Frequencies, *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, 25(3), 446-452, 2002.
- [15] Finetti M., Scorzoni A. and G. Soncini, Lateral current crowding effects on contact resistance measurements in four terminal resistor test patterns, *IEEE Electron Device Letters*, 5(12), 524-526, 1984.