

# Liste des figures

*Figure I.1* : Schéma du premier microsystème : un transistor MOS à grille résonante (1967).

*Figure I. 2* : Représentation schématique d'un capteur.

*Figure I. 3* : Représentation schématique d'un actionneur.

*Figure II.1* : Structure d'un capteur de force piézorésistif.

*Figure II.2* : Système de coordonnées cartésien utilisé pour les calculs.

*Figure II.3* : Structure de microlevier étudié.

*Figure II.4* : microlevier: (a) en repos - (b) contraint après application de  $F_z$ .

*Figure II.5* : charge ponctuelle  $F_z$  appliquée au bord du microlevier.

*Figure II.6* : Moment fléchissant pour un microlevier de longueur  $L = 400 \mu\text{m}$  dans le cas d'une charge : (a) $F_z = 100 \text{ nN}$ , (b)  $F_z = - 100 \text{ nN}$ .

*Figure II.7* : Schéma de la déflexion d'un microlevier soumis à une force ponctuelle.

*Figure II.8* : Schéma représentant la déflexion et la pente maximale ainsi que le rayon de courbure d'un microlevier soumis à une force  $F_z$ .

*Figure II.9* : Contrainte longitudinale pour un microlevier de longueur  $L = 400 \mu\text{m}$  dans le cas d'une charge : (a) $F_z = 100\text{nN}$ , (b)  $F_z = -100\text{nN}$ .

*Figure II.10* : Déflexion en fonction de la contrainte pour un microlevier de longueur  $L = 400\mu\text{m}$  dans le cas d'une charge  $F_z = 100\text{nN}$ .

*Figure II.11* : Déplacement du microlevier en fonction de  $x$ , pour une force  $F_{z1} = - 100 \text{ nN}$ ,  $F_{z2} = - 200 \text{ nN}$  et  $F_{z3} = - 300 \text{ nN}$ .

*Figure II.12* : La pente du microlevier en Si en fonction de la distance  $x$  de sa base, pour une force  $F_{z1} = 100 \text{ nN}$ ,  $F_{z2} = 200 \text{ nN}$  et  $F_{z3} = 300 \text{ nN}$ .

*Figure II.13* :Déplacement en fonction de la force appliquée.

*Figure II.14* : Oscillateur harmonique (système à un seul degré de liberté) en mouvement de vibration libre et amortie.

*Figure II.15* : La déflexion des trois premiers modes de vibration d'un microlevier en mouvement de vibration libre transversale.

*Figure II.16* : Modèle de la sphère équivalente.

*Figure II.17* : Organigramme d'une analyse structurale avec ANSYS.

*Figure II.18* : microlevier encastré à une extrémité et soumis à une force ponctuelle à l'autre, avec un maillage de 20.

*Figure II.19* : Déflexion du microlevier pour  $F_z = -100\text{nN}$ .

*Figure II.20* : Résultats numériques du déplacement dans chaque nœud pour  $F_z = -100\text{nN}$  et  $\rho=2330\text{ Kg/m}^3$ .

*Figure II.21* : Comparaison des résultats théoriques et par simulation du déplacement maximal en fonction de la force appliquée  $F_z$  pour des valeurs : (a)  $F_z = 30\text{ nN}$  à  $500\text{ nN}$ . (b)  $F_z = 1\text{ }\mu\text{N}$  à  $30\text{ }\mu\text{N}$ .

*Figure II.22* : Comparaison des résultats théoriques et par simulation du moment de flexion en fonction de la force appliquée  $F_z$  pour des valeurs : (a)  $F_z = 30\text{ nN}$  à  $500\text{ nN}$ . (b)  $F_z = 1\text{ }\mu\text{N}$  à  $30\text{ }\mu\text{N}$ .

*Figure II.23* : Résultats de simulations sur une micropoutre rectangulaire de  $400\text{ }\mu\text{m}$  de longueur,  $100\text{ }\mu\text{m}$  de largeur et  $1\text{ }\mu\text{m}$  d'épaisseur. a) Flexion de la poutre pour  $F_z = -100\text{ nN}$ . b) et c) Déformations longitudinales et transversales de la poutre.

*Figure II.24* : Fréquence de résonance(Hz) pour les cinq premiers modes.

*Figure II.25* : Déformation de la micropoutre pour : (a) 1<sup>ier</sup> mode, (b) 2<sup>ième</sup> mode, (c) 3<sup>ième</sup> mode et (d) 4<sup>ième</sup> mode.

*Figure II.26* : Courbe de variation des coefficients piézorésistifs du silicium dans le plan (100) : (a) Si de type n, (b) Si de type p.

*Figure II.27* : Vue schématique d'une poutre encastrée libre, recouverte d'une jauge, soumise à une charge normale.

*Figure II.28* : la sensibilité du microlevier en fonction de la déflexion maximale.

*Figure III.1* : Schéma de principe d'un AFM.

*Figure III.2* : Méthodes de détection externe : (a) par effet tunnel, (b) par détection capacitive.

*Figure III. 3* : Méthodes de détection externe : (c) par déflexion optique, (d) par interférométrie.

*Figure III.4* : Détection piézorésistive.

*Figure III.5* : Le système microlevier - pointe en AFM est assimilable à un ressort dont l'allongement est fonction de la force d'interaction pointe – surface.

*Figure III.6* : images des microleviers d'AFM obtenues par microscopie électronique : (a) de forme rectangulaire, (b) en forme de V.

*Figure III. 7* : Schéma d'un microlevier uniforme, de section rectangulaire et sa pointe en contact avec la surface de l'échantillon.

*Figure III.8* :  $\xi_z(x)$  en fonction de la distance  $x$ , pour une force normale  $F_z$ .

*Figure III.9* : La pente du microlevier en fonction de  $x$ , pour une force  $F_{x1} = 100$  nN,  $F_{x2} = 200$  nN et  $F_{x3} = 300$  nN.

*Figure III.10* : Déplacement du microlevier en fonction de  $x$ , pour une force  $F_{x1} = 100$  nN,  $F_{x2} = 200$  nN et  $F_{x3} = 300$  nN.

*Figure III.11* : le rapport des constantes de raideur angulaires et linéaires du microlevier  $\xi_z(x)$  en fonction de  $x$  pour une force  $F_x$ .

*Figure III.12* : la pente du microlevier,  $\theta y(x)$  en fonction de  $x$  pour une force  $F_{y1} = 100$  nN,  $F_{y2} = 200$  nN et  $F_{y3} = 300$  nN.

*Figure III.13* : Microlevier en forme de V.

*Figure III.14* : vue d'ensemble de différents types de pointes par microscopie électronique.

*Figure III.15* : pointe usée observée à la microscopie électronique.

*Figure III.16* : Représentation de la force d'interaction interatomique selon un potentiel de Lennard - Jones en fonction de la distance de séparation des noyaux  $r$ .

*Figure III.17* : Les forces entre les atomes de la pointe et ceux de l'échantillon.

*Figure III.18* : La pointe et la surface de l'échantillon en contact.

*Figure III.19* : Principe du mode contact.

*Figure III.20* : courbe de force obtenue en mode contact.

*Figure III.21* : effets de la géométrie de la pointe sur l'image enregistrée (rouge) ; a) au passage d'un creux, b) au passage d'une marche.

*Figure III.22* : Dessin démontrant la taille d'une particule, mesurée par l'AFM. La particule située dans une vallée apparaît plus aplatie que la particule située sur une bosse ( $h_1 < h_2$ ).

*Figure IV.1* : Le SOI.

*Figure IV. 2* : Procédé de lithographie.

*Figure IV.3* : Schéma d'une chambre utilisée pour la gravure au plasma.

*Figure IV.4* : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope.

*Figure IV.5*: Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope.

*Figure IV.6*: vue de quelques types de pointes par microscopie électronique.

*Figure IV.7*: (a) : masque pour créer une pointe carré, (b) : masque pour créer une pointe circulaire.

*Figure IV.8* : Vue en coupe du procédé technologique : oxydation, ouverture et dopage.

*Figure IV.9* : Vue en coupe du procédé : ouverture contacts jauges.

*Figure IV.10* : Définition des zones recouvertes d'aluminium.

*Figure IV.11* : Gravure face avant DRIE.

*Figure IV.12* : Gravure face arrière : libération des poutres.

*Figure IV.13* : Vue en coupe des principales opérations technologiques dédiées à la réalisation du microlevier piézorésistif.

*Figure A.1* : rayon de courbure

*Figure B.1* : Élément de barre mince sollicité en flexion. A gauche, détail du moment de flexion et de l'effort tranchant, tous les deux internes, agissant sur le volume élémentaires ( $dx, dy, dz$ ).

*Figure C.1* : barreau semiconducteur soumis à une contrainte longitudinale.

*Figure C.2* : barreau semiconducteur soumis à une contrainte transversale.

*Figure C.3* : Définition des contraintes normales et tangentielles.

*Figure C.4* : Diagramme E(k) du silicium monocristallin.

*Figure C.5* : Effet d'une contrainte uniaxiale sur les surfaces de même énergie.

*Figure C.6* : Variation en fonction du dopage des coefficients de piézorésistivité  $\pi_{44}$  pour le Silicium de type P et  $\pi_{11}$  pour le Silicium type N.

*Figure C.7* : Variation du coefficient de piézorésistivité  $\pi_{11}$  du Si-N et du coefficient  $\pi_{44}$  du Si-P en fonction de la température.

*Figure C.8* : Courbes de variations, paramétrées en température, du facteur de piézorésistance du Silicium de type N et P.

*Figure D.1* : Microlevier uniforme en forme de V.