

6. Conclusions

En aquest treball s'ha establert una metodologia d'anàlisi i caracterització del comportament tèrmic, mecànic i termomecànic d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas. Les simulacions numèriques han estat validades a través de mesures experimentals, que a més han permès fixar i investigar les propietats dels materials presents en les estructures. Aquesta combinació de tècniques experimentals i càlculs numèrics és igualment aplicable a altres tipus de sistemes microelectromecànics susceptibles de ser analitzats des del punt de vista termomecànic.

Pel que fa a l'estudi de les membranes tancades:

L'estudi del comportament tèrmic de les estructures micromecanitzades ha permès obtenir les característiques bàsiques que controlaran el comportament del sensor, com són el consum en potència, la distribució de temperatura i el temps de resposta del substrat. S'han determinat possibles dissenys que disminueixen les pèrdues tèrmiques i milloren el consum en potència. Més enllà, la simulació numèrica ha permès quantificar les pèrdues en aquests tipus d'estructures i separar-les segons siguin per conducció, convecció i radiació.

S'ha analitzat el comportament tèrmic de substrats micromecanitzats coberts amb microgotetes de SnO₂. Les simulacions preveuen que les dimensions laterals de la gota tenen una influència més important en les pèrdues tèrmiques per conducció que no pas el seu gruix. Aquests resultats, validats a través de mesures termoelèctriques i amb termografia infraroja, obliguen a confinar la microgota dins l'àrea activa del substrat per tal d'optimitzar el consum en potència del sensor.

La resposta dinàmica del sistema, ja sigui per règims polsats, en rampa o sinusoidals queda caracteritzada pel coneixement de seu temps de resposta. S'han obtingut els temps de resposta dels substrats amb i sense microgota de SnO₂. Els temps obtinguts estan molt per sota dels temps característics de l'activitat sensora.

Respecte el comportament mecànic, s'ha vist que el procés de fabricació dut a terme al CNM permet obtenir membranes ben compensades en estrès. Així, l'estrès mig actuant, calculat a través de mesures de deformació residual, es d'uns 20MPa compressius, que estan lluny dels valors crítics (100MPa) que indueixen la fractura de la membrana.

L'estudi de la deflexió de la membrana per diferents temperatures de treball a través de mesures mitjançant microscopia interferomètrica i confocal, permet validar els models MEF mecànics que seran utilitzats per analitzar la distribució d'estressos en la membrana

L'anàlisi detallada de la distribució d'estressos en la membrana, obtinguda mitjançant simulacions, permet relacionar els stressos induïts tèrmicament amb els mecanismes de degradació observats. Al portar els sensors al límit de la seva operativitat, s'ha vist que aquests es trenquen a temperatures al voltant dels 700°C.

El rang de treball de sensors micromecanitzats coberts amb microgotetes de SnO₂ es pot fixar entre els 20 i els 450°C. Dins d'aquest rang les deformacions i les tensions induïdes tèrmicament en la capa sensora i en la membrana són admissibles. Per sobre, s'ha observat la formació d'esquerdes en la gota i la pèrdua d'adherència entre aquesta i la membrana. Per microgotetes no centrades o amb diàmetres majors que l'àrea activa, la temperatura de fractura depèn fortament de la geometria de la gota i en general disminueix considerablement.

S'ha vist que el comportament a fatiga dels substrats micromecanitzats i més en concret del materials que el formen, es mostra fonamental per tal d'assegurar una vida mitja suficient i que garantitzi la viabilitat del sensor.

Així, les simulacions termomecàniques prediuen que la presència d'alumini en els substrats limita la temperatura de treball a 300°C, si es volen obtenir vides mitges per sobre d'un any ($2 \cdot 10^6$ cicles, 15 segons/cicle).

L'alternativa pot passar per la utilització del platí. La seva caracterització termomecànica mitjançant nanoindentació i difracció de raigs X, ha demostrat que, pels gruixos emprats en sensors de gas i fins els 600°C, presenta un comportament totalment elàstic, que fa que la seu comportament a fatiga estigui dins el règim de fatiga a vides llargues, $N > 10^6 - 10^7$.

Pel que fa a les membranes suspeses:

La combinació de simulacions termoflúidiques, mesures termoelèctriques i mesures amb termografia infraroja, ha permès determinar que per temperatures per sobre els 250°C, les pèrdues per convecció natural representen un 15-20% de les pèrdues totals.

La menor rigidesa de les membranes suspeses permet treballar fins a temperatures mitges al voltant dels 900°C. Ara bé s'ha vist que aquests substrats no són compatibles amb els òxids metàl·lics dipositats sobre la membrana mitjançant tècniques de capa gruixuda com pot ser el microgoteig. En aquests casos, s'ha observat que gran part dels substrats es fracturen durant les primeres operacions del sensor. Això és degut a la menor rigidesa de la membrana en combinació amb l'alt nivell d'estressos induïts per la microgota. Per tant, tal com està concebut aquest disseny, només pot ser viable amb materials sensors de tipus capa prima.

L'estudi de la degradació a altes temperatures de les metalitzacions de Pt-Ti permet concloure que a partir dels 400°C, el Ti difon dins el Pt a través dels límits de gra i s'oxida. Aquest fet provoca l'augment de l'estrès compressiu en el Pt, que indueix la formació de protuberàncies i la degradació de la capa. A més, la reducció del Ti en la interfície disminueix l'adherència entre el metall i els dielèctrics, provocant delaminacions i degradacions que han estat observades òpticament i mitjançant AFM.

Estructures estables a altes temperatures requereixen altres capes d'adherència com pot ser el Ta o el TaSi, o bé afegir un pas en el procés de fabricació que permeti l'oxidació del Ti prèvia al dipòsit del Pt.

Finalment, de la metodologia d'anàlisi electro-termo-mecànic que s'ha dut a terme, es poden obtenir regles de disseny per la implementació de microsisemes que treballin en diferents règims de temperatura i en concret, directament aplicables al disseny i fabricació d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas.