

1. Introducció

1.1 Introducció

Des de sempre els gasos han estat relacionats amb l'activitat humana, i les olors d'aquests influeixen de manera notable en la imatge que tenim del nostre entorn. El nas del home és un sistema sensor altament avançat i extremadament complexe que permet diferenciar entre centenars d'olors diferents però és incapaç de detectar gasos inolors o bé discernir concentracions. Aquestes carències han motivat de sempre la recerca de sistemes artificials que supleixin i millorin l'activitat del nas humà. Així per exemple, es busquen dispositius sensors de gasos que donin suport en aplicacions de seguretat a on hi són presents gasos combustibles o tòxics, o bé en aplicacions de confort per tal d'assegurar la qualitat de l'aire en entorns tancats com poden ser vehicles o edificis. Altres aplicacions les podem trobar en el control de processos industrials i en aplicacions d'anàlisi en laboratori.

En el control de processos i en les aplicacions d'anàlisi es requereix una alta fiabilitat i precisió en la detecció dels diferents compostos gasosos, per la qual cosa sovint s'utilitzen sistemes de detecció de gran volum i alt cost. Són generalment sistemes espectroscòpics o bé dispositius basats en l'anàlisi directa de les propietats fonamentals dels gasos, com pot ser la massa molecular o l'espectre vibracional. Per la resta d'aplicacions s'intenta amotllar els tipus de dispositiu a l'àmbit de treball sense deixar mai de banda les possibles optimitzacions del sistema a implementar.

Dins d'aquest àmbit, la majoria dels treballs de recerca i desenvolupament es centren en el disseny i l'obtenció de dispositius sensors de baix cost, amb dimensions reduïdes, fàcils de manipular i transportar i que ofereixin una sensibilitat, selectivitat i estabilitat d'acord amb l'aplicació per a la que es proposen.

Aquesta recerca ha generat una gran varietat de dispositius basats en diferents principis sensors, que es poden englobar en dos grups a part dels abans esmentats: sensors òptics i sensors d'estat sòlid.

El primer grup, sensors òptics, es basen en la mesura de l'espectre d'absorció del gas a detectar. Aquests tipus de sensor requereixen doncs, una font d'excitació monocromàtica conjuntament amb el dispositiu sensor que analitzi de l'espectre. La integració d'ambdós components, conjuntament amb l'electrònica de control que es requereix i la complexitat associada al ensamblatge del conjunt, fa que aquests tipus de sensors siguin excessivament cars i de fabricació complexa.

Finalment, els sensors d'estat sòlid es basen en el canvi de les propietats, ja siguin físiques o químiques, d'un material sensor quan aquest és exposat a un determinat gas. Aquests canvis depenen de la interacció material sensor-gas i en gran nombre de casos es tradueixen en una modificació de les propietats elèctriques.

Les tecnologies necessàries per la fabricació dels sensors d'estat sòlid així com l'electrònica que tenen associada fa que el cost d'aquest tipus de sensor estigui molt per sota al de la resta.

1.2 Sensors de gas semiconductors

La [Figura 1.1](#) mostra la demanda mundial dels diferents tipus de sensors d'estat sòlid per aplicacions de mesura i control d'emissió de gasos [Schr88]. Com es pot veure, dins dels diferents tipus de sensors d'estat sòlid, els sensors de gas semiconductors han experimental un desenvolupament que està per sobre la resta.

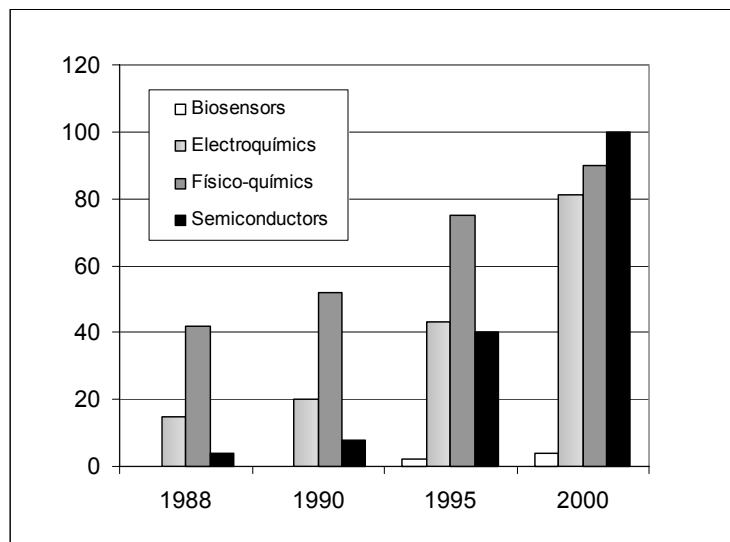


Figura 1.1: Demanda mundial de sensors d'estat sòlid per aplicacions en el control i la mesura d'emissió de gasos. Quantitats en 10^6 € [Schr88].

Els sensors de gas semiconductors es basen en el canvi de resistivitat elèctrica del material sensor, generalment un òxid metàl·lic, al ser exposat a un gas. En la majoria de casos, aquest canvi de resistivitat està relacionat amb la reacció o recombinació dels àtoms d'oxigen ambient amb els àtoms o les vacants del material sensor. Aquesta reacció canvia la barrera de potencial entre els grans (oxigen atrapat en la superfície) o modifica la conductivitat del material a través de la recombinació amb les vacants. En ambdós casos es

produceix un canvi en la resistivitat elèctrica del material, que es la base de funcionament del sensor.

La idea d'utilitzar els semiconductors com a dispositius sensors de gas va començar el 1952 quan Brattain i Bardeen van comprovar les propietats sensores del Germani [Brat52]. Deu anys més tard s'investiguen els òxids metàl·lics com a materials sensors, i finalment el 1970, Taguchi converteix els sensors de gas semiconductors de SnO_2 en un producte industrial [Tagu62,Tagu70].

Existeix una gran varietat d'òxids metàl·lics susceptibles de ser utilitzats com a sensors de gas, dels que destaquen, SnO_2 , ZnO , TiO_2 , WO_3 essent SnO_2 el més popular i el més emprat en sensors comercials per aplicacions domèstiques.

Taula 1.1: Mètodes de preparació, implementació i dipòsit d'òxids metàl·lics [Sber92,Göpe95,Sber95, Bârs99,Cire00,Simo01]

Preparació del material	Implementació en els sensors	Producció i dipòsit
Sol-Gel	Impressió (<i>screen printing</i>)	Pirolisis líquida
Pirolisis líquida	Cobriment amb esprai	Pirolisis amb esprai
Processat amb microones	Microgotes	Pulverització catòdica (<i>sputtering</i>) Dipòsit físic en fase vapor (PVD) Dipòsit químic en fase vapor (CVD)

Per tal d'obtenir i preparar aquests materials sensors s'utilitzen adaptacions de tecnologies emprades en el camp de l'electrònica i la química com poden ser la pulverització catòdica (*sputtering*), el dipòsit químic per evaporació (CVD), els processos d'impressió de capes (*screen-printing*) o de sol-gel. La Taula 1.1 recull diferents mètodes de dipòsit i preparació d'òxids metàl·lics. Són tècniques ben establertes que ofereixen un alt control dels paràmetres que influeixen en la preparació de la mostra. A més, alguna d'elles com pot ser la impressió de capes o la pulverització catòdica, permeten reduir el cost de la mostra en la producció de grans sèries.

Aquestes raons, conjuntament amb l'increment de la regulació en el control de les emissions tòxiques per part dels diferents països, amb el corresponent augment de la demanda de dispositius sensors, expliquen l'alt desenvolupament dels sensors de gas semiconductors enfront dels altres tipus de sensors d'estat sòlid.

Com a dispositiu, el sensor de gas està format per dues parts principals que són: la part sensora i el substrat. La part sensora inclou l'òxid metàl·lic degudament tractat, que al interactuar amb el gas veu modificada la seva resistivitat elèctrica. La funció transductora es realitza mitjançant la mesura d'aquests canvis de resistivitat a través dels corresponents electrodes i connexions elèctriques implementades en el substrat. Degut a que la sensibilitat de l'òxid metàl·lic varia amb la temperatura, el substrat inclou en el seu disseny un element calefactor, típicament una resistència elèctrica. Tots aquest elements van muntats al damunt d'un material o estructura que li dona rigidesa al conjunt i permet la seva manipulació. La [Figura 1.2](#) mostra l'esquema d'un sensor de gas.

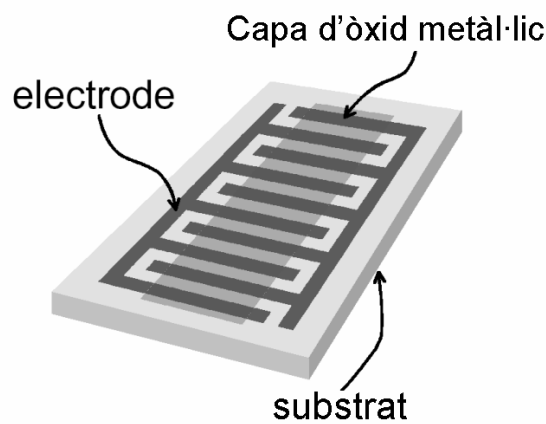


Figura 1.2: Esquema d'un sensor de gas semiconductor amb la resistència escalfadora en la cara posterior del substrat.

1.2.1 Materials sensors

La diferència més general entre els diferents mètodes de preparació o dipòsit dels materials sensors recau en el gruix de la capa que s'obté. Així, els mètodes de dipòsit químic i físic (CVD, PVD) permeten l'obtenció de capes amb gruixos entre els 20 i els 1000nm. Són les anomenades capes primes. Per altra banda, emprant les tècniques d'impressió de capes o el dipòsit de microgotetes s'obtenen materials amb gruixos al voltant les desenes de micres, anomenades capes gruixudes [Bârs99,Cire00,Simo01].

Més enllà de la classificació entre capes primes o gruixudes cal considerar el tipus de microestructura produïda per cada un dels mètodes de preparació. La microestructura del

material sensor té una gran importància ja que determina el mode de treball del sensor. Bàrsan distingeix entre dos tipus de microestructures [Bârs99], les capes compactes i les capes poroses. Les primeres s'obtenen amb la majoria de tècniques de dipòsit en fase vapor (CVD, PVD) mentre que les capes poroses s'obtenen emprant tècniques de dipòsit de capes gruixudes i tècniques RGTO (creixement reotaxial i oxidació tèrmica de capes d'estany). Hi ha diferències importants entre la interacció de les capes compactes i les poroses amb els gasos ambientals.

Així, en les capes poroses formades per partícules de dimensions al voltant dels nanometres, els gasos poden accedir a quasi la totalitat del volum de la capa sensora mentre que en les capes compactes, el gas només pot interactuar amb la superfície de la capa.

Això fa que la superfície activa als gasos en les capes poroses sigui molt més gran que no pas en les capes compactes, per la qual cosa s'espera que aquestes capes ofereixin una millor sensibilitat. Una mostra de capes poroses i compactes es pot veure en la [Figura 1.3](#).

Aquest fet és un argument important pel desenvolupament i millora de mètodes per a la obtenció d'òxids metàl·lics en forma de capes poroses que, combinats amb substrats cada vegada més optimitzats, permetin millorar les prestacions del sensor de gas.

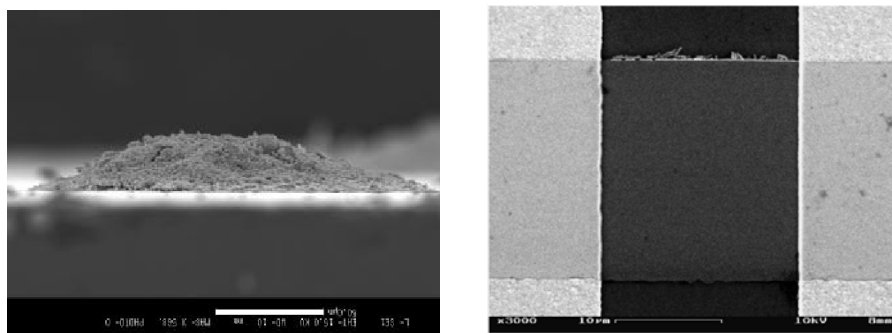


Figura 1.3: Esquerre: Microgota de SnO₂ dipositada mitjançant microdipòsit de gotes [Cerd01]. Dreta: Capa de SnO₂ dipositada per pulverització catòdica (*sputtering*) [Simo01].

1.2.2 Substrats

A temperatura ambient, el canvi de resistivitat dels òxids metàl·lics semiconductors sota la presència de diferents gasos és molt dèbil. El canvi màxim s'obté quan el material sensor es troba a temperatures entre 200 i 800°C. La temperatura exacta depèn del gas a detectar, del material sensor i de la càrrega amb additiu catalític d'aquest. Aquest comportament implica la incorporació en el dispositiu d'un element dissipador de calor, típicament una resistència elèctrica, que sumada als electrodes i al substrat configuren l'estructura total del sensor.

En l'actualitat, la majoria de sensors de gas comercials estan fabricats emprant la tècnica d'impressió de capes (*screen-printing*) al damunt de substrats ceràmics [Figaro,Fis,Capteurs].

Tot i les bones prestacions d'aquest tipus de dispositius, els sensor de gas amb substrat ceràmics presenten aspectes que han de ser millorats. Aquests aspectes es basen bàsicament en la millora de la selectivitat del sensor, la tecnologia d'encapsulat i sobretot en el consum en potència.

Aquest tipus de sensor consumeixen entre 200mW i 1W, la qual cosa suposa un consum excessiu sobretot si es volen tenir en compte aplicacions que requereixin sistemes portàtils alimentats per bateries. Per tal de millorar aquest comportament s'estan analitzant diferents millores de les que destaquen la utilització de substrats primers d'alúmina [Fis,Capteurs] o bé la introducció d'additius catalítics que poden aconseguir, en el millor dels casos, reduir la temperatura de treball a la meitat [Schw96].

Per altra banda encapsular aquest tipus de sensor és complex ja que s'han de dissenyar sistemes ben aïllats tèrmicament i amb bona estabilitat mecànica. L'aïllament tèrmic no només és un requeriment per tal de reduir el consum en potència del sensor. Caldrà que les altes temperatures de treball induïdes per l'element calefactor no afectin a la resta d'elements del sensor, en especial a l'electrònica de control associada. El compromís entre ambdós aspectes no és sempre fàcil d'aconseguir. En la [Figura 1.4](#) es recullen diferents configuracions.

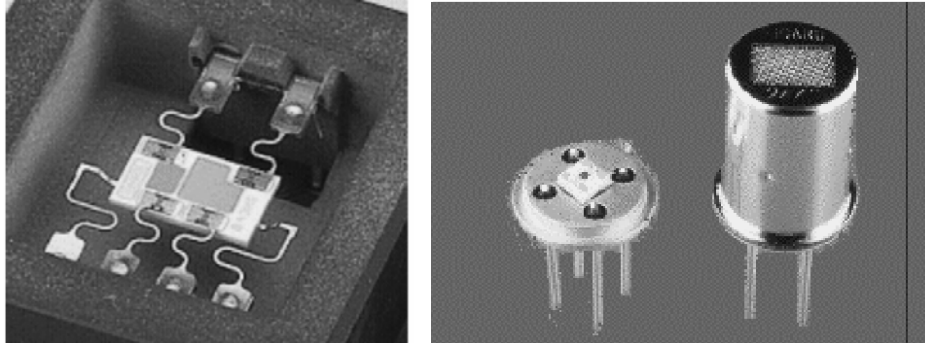


Figura 1.4: Diferents configuracions de sensors de gas amb substrats ceràmics. Esquerra [Bosch]. Dreta [Figaro].

Finalment, aquests tipus de sensor ofereixen una bona selectivitat només en aquelles aplicacions a on el nombre de gasos presents es limitat. Cal remarcar que aquesta manca de selectivitat no és sempre un problema, sobretot si s'utilitzen en matrius de sensors. Es pot millorar la selectivitat del sensor si es treballa en règims de temperatura polsada. Aquest mode de treball aprofita el fet de que la temperatura per la qual la sensibilitat del sensor és màxima depèn del gas a detectar. Degut a l'alta massa tèrmica dels substrats ceràmics, sovint els temps de resposta són de l'ordre de les desenes de segon, la qual cosa fa difícil utilitzar aquests tipus de substrats en règims de treball polsats.

Les dificultats trobades en l'optimització de sensors de gas fabricats en substrats ceràmics han donat lloc al desenvolupament de nous tipus de substrats basats en les tècniques de micromecanitzat del silici. Els nous substrats són estructures micromecanitzades fabricades mitjançant la combinació de les tècniques estàndards i compatibles CMOS i els processos de micromecanització del silici.

Aquesta tecnologia s'ha revelat molt prometedora per tal de millorar, de fet ja ho està fent, les característiques dels sensors de gas fabricats amb substrats ceràmics. La [Figura 1.5](#) mostra un esquema d'aquests tipus de sensors.

En aquest tipus d'estructures es diposita el material sensor al damunt d'una membrana prima fabricada emprant el micromecanitzat del substrat de silici i formada per una apilament de capes de diferents materials, típicament silici i òxids i nitrurs de silici. Enterrada entre les capes de la membrana, o bé en la superfície d'aquesta, s'integra una microresistència que permet escalfar el material sensor. En la superfície de la membrana es dipositen els electrodes metàl·lics que estan en contacte directe amb la capa sensora, de manera que proporcionen la connexió elèctrica que permet la mesura dels canvis de resistivitat.

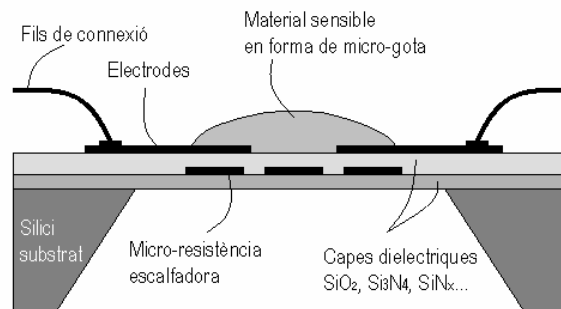


Figura 1.5: Esquema de la secció d'un sensor de gas micromecanitzat.

Els gruixos reduïts de les capes que componen la membrana ($<1\mu\text{m}$) [Such93, Lee96] conjuntament amb la baixa conductivitat tèrmica dels materials, permet un bon aïllament tèrmic entre l'àrea on s'ha dipositat el material sensor, anomenada àrea activa, i la resta del substrat de silici. L'aïllament tèrmic permet escalfar l'àrea activa fins als $300\text{-}400^\circ\text{C}$ sense que la temperatura a la vora de la membrana superi en pocs graus la temperatura ambient [Dibb90, Fung96, Götz97a, Sber97]. Aquest aïllament, a part de reduir considerablement el consum en potència fins el rang dels mW, permet la integració en el mateix substrat de silici de l'electrònica de control [Götz01]. Finalment, la reducció dels gruixos dels materials que componen la membrana, disminueix considerablement la massa tèrmica i permet tenir temps de resposta al voltant dels $10\text{-}20\text{ms}$ [Pike97, Jaeg99, Puig02b] que els fa aptes per funcionar en règims de treball modulats en temperatura. En definitiva, s'aconsegueix doncs un dispositiu més integrat, de dimensions reduïdes i baix consum.

Cal dir també però, que degut a la tecnologia emprada, el cost de fabricació d'aquest tipus de sensor està molt per sobre que el de la resta. Ara bé, la important millora en les prestacions del sensor, així com una reducció del cost individual en la fabricació de grans series, justifica àmpliament el desenvolupament i utilització d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas.

Les [Figures 1.6](#), [1.7](#) i [1.8](#) mostren diferents tipus de sensors micromecanitzats comercialitzats per diverses companyies. Inicialment van ser desenvolupats per Motorola i per Microsens [Microsens], [Figura 1.6](#) i [1.7](#), respectivament. En aquests sensors comercials, la capa sensora es dipositada per evaporació catòdica o bé mitjançant RGTO.

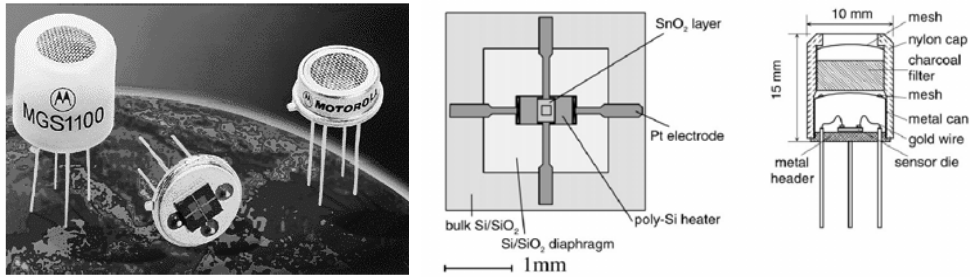


Figura 1.6: Sensor micromecanitzat desenvolupat per Motorola [Bosc97,Asti00]

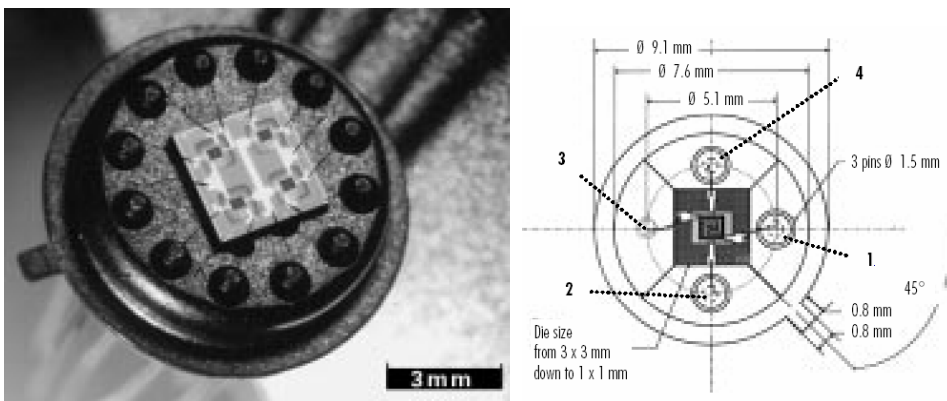


Figura 1.7: Sensor micromecanitzat desenvolupat per Microsens [Microsens]

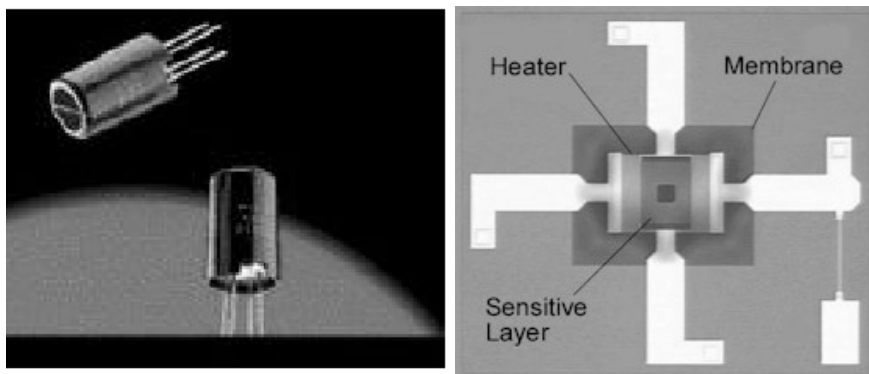


Figura 1.8: Sensor micromecanitzat desenvolupat per Mics [Mics]

1.3 Problemes tèrmics i mecànics en sensors de gas micromecanitzats

Com s'ha exposat en els punts anteriors els substrats micromecanitzats ofereixen tota una sèrie d'avantatges enfront altres tipus de substrats. Ara bé, aquests tipus de substrats també presenten problemes relacionats amb el seu comportament tèrmic, mecànic i termomecànic.

Des del punt de vista tèrmic, una distribució de temperatura en l'àrea activa poc uniforme provoca que el material sensor no estigui tot ell a la mateixa temperatura, per la qual cosa es poden produir pèrdues de selectivitat i sensitivitat del sensor [Asti00,Grac01,Bria01]. A més, les dimensions i gruixos de la membrana no sempre permeten optimitzar el consum en potència del sensor. Així, una relació errònia entre les dimensions laterals de l'àrea activa i la membrana produeix un augment del consum en potència que pot arribar a ser important [Götz97a,Ross97,Simo01]

On apareixen més problemes és en el comportament mecànic i termomecànic. Així, les capes que formen el substrat micromecanitzat presenten estressos residuals importants [Ross97,Kim01]. Aquests estressos es generen durant els processos de fabricació, ja siguin processos estàndards CMOS i/o processos addicionals. Són fortament dependents de les condicions del procés i la seva magnitud domina el comportament mecànic del substrat [Low98,Puig01,Bria02]. Estressos residuals tensils són responsables de la mala d'adherència entre capes que poden produir problemes de contactes, formació de microfissures o delaminacions entre materials. Per altra banda, els estressos residuals compressius poden provocar el vinclament de les capes, la formació de protuberàncies (*hillocks*), o degut a una deformació excessiva, la fractura total de la membrana.

Per altra banda, durant l'operació del sensor, les altes temperatures produïdes en l'àrea activa indueixen una distribució de temperatures no uniforme sobre la membrana. Aquesta distribució origina estressos tèrmics degut a la diferència entre els coeficients d'expansió tèrmica dels materials que combinats amb els estressos residuals indueixen la formació de mecanismes de degradació com poden ser la formació de forats, protuberàncies, delaminacions o la ruptura del sensor [Vizv01,Bria02,Puig03b].

Finalment, la presència, en forma de capa gruixuda, del material sensor influeix en el comportament tant tèrmic com mecànic del substrat. Capes gruixudes modifiquen la distribució de temperatures per la seva pròpia presència, poden incrementar les pèrdues de

calor per conducció a través de la membrana i afegeixen massa tèrmica al sensor amb el corresponent augment del temps de resposta [Bria01,Puig02a]. A nivell mecànic la capa sensora introdueix estressos residuals addicionals als ja presents en els diferents materials que configuren la membrana. La deformació de la membrana durant el funcionament del sensor sovint indueix estressos al material sensor que introdueixen problemes de connexió amb els electrodes, poden provocar microfisures o alterar el seu comportament [Shen01,Yan01].

1.4 Objectiu de la Tesi

Com s'ha exposat en els punts anteriors els substrats micromecanitzats ofereixen tota una sèrie d'avantatges enfront altres tipus de substrats. Ara bé, en el seu procés de disseny i implementació s'han de tenir en compte aspectes tèrmics i mecànics sovint complexos. Per tal de minimitzar possibles problemes i que els avantatges puguin ser optimitzats cal conèixer en profunditat el comportament d'aquestes estructures des del punt de vista tèrmic, mecànic i termomecànic. Aquest és l'objectiu d'aquesta tesi, l'anàlisi tèrmic, mecànic i termomecànic d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas.

- L'anàlisi tèrmica ha de permetre la millora del aïllament tèrmic del sensor, la millora de la distribució de temperatures en l'àrea activa així com reduir les pèrdues de calor per tal de minimitzar al màxim el consum en potència. A més, interessarà conèixer i optimitzar la dinàmica tèrmica del substrat si es té previst treballar en modes de treball amb modulació de temperatura.
- Ens interessarà un substrat micromecanitzat compensat en estrès i amb una rigidesa prou alta que permeti el dipòsit del material sensor. Es necessària doncs, una revisió i estudi dels estressos residuals en les capes que formen els substrats micromecanitzats per tal d'analitzar la seva influència en el comportament mecànic.
- Caldrà investigar l'aparició de problemes termomecànics com la degradació i delaminació de les capes, la formació de protuberàncies i forats així com determinar les zones i la temperatura de fractura de la membrana.
- En tots tres casos, la interacció entre la capa sensora i el substrat micromecanitzat així com l'influència del material sensor en el comportament global del dispositiu han de ser aspectes a investigar.
- S'espera que el treball realitzat permeti establir una metodologia general de caracterització tèrmica, mecànica i termomecànica per a sistemes microelectromecànics (MEMS, *micro electro mechanical systems*) i en concret permeti l'obtenció de regles de disseny que permetin l'optimització dels sensors de gas micromecanitzats.

1.5 Referències

- [Asti00] S. Astié, A.M. Gué, E. Scheid, J.P. Guillemet. "Design of a low power SnO₂ gas sensors integrated on silicon oxynitride membrane". *Sens. Actuators A* 67 (2000) 84-88.
- [Bárs99] N. Bársan, M. Schweizer-Berberich, W. Göpel, "Fundamental and practical aspects in the design of nanoscaled SnO₂ gas sensors: a status report" *Rresenius J. Anal. Chem.* 365 (4) (1999) 287-304.
- [Bosc97] J. M. Bosc, J. P. Odile, "Micromachined structure reliability testing specificity. The Motorola MGS1100 gas sensor example" *Microelectron. Reliab.* 37 10/11 (1997) 1794-1794.
- [Bosch] Companyia Rober Bosch GmbH, sensor LGS2.
- [Brat53] W. H. Brattain, J. Bardeen, *Bell Systems Tech. J.* 32 1 (1953).
- [Bria02] D. Briand, S. Heimgartner, M. Dadrás, N. F. de Rooij, "On the reliability of a Platinum heater for micro-hotplates" *Eurosensors XVI. European Conference on Solid-State Transducers. Praga. Rep. Checa.* (2002) 474-477.
- [Capteurs] Companyia de sensors de gas Capteurs Sensors Ltd. Inc. www.capteur.co.uk
- [Cerd01] J. Cerdà, A. Cirera, A. Vilà, A. Cornet, J. R. Morante, "Deposition on micromachined silicon substrates of gas sensitive layers obtained by a wet chemical route: a CO/CH₄ high performance sensor" *Thin Solid Films* 391 (2001) 265-269.
- [Cire00] A. Cirera, "New technologies and their characterisation for nanostructured SnO₂ gas sensor devices" Tesis Doctoral (2000), Departament d'Electrònica, Universitat de Barcelona.
- [Dibb90] U. Dibbern. "A substrate for thin-film gas sensor in microelectronic technology". *Sens. Actuators B* (1990) 63-70.
- [Figaro] Companyia de sensors de gas FIGARO i FIGARO USA Inc. www.figarosensor.com
- [Fis] Companyia de sensors de gas FIS Inc. www.fisinc.co.jp
- [Fung96] S. K. H. Fung, Z. Tang, P. C. H. Chan, J. K. O. Sin, P. W. Cheung, "Thermal analysis and design of a micro-hotplate for integrated gas-sensor applications" *Sens. Actuators A* 54 (1996) 482-487.
- [Göpe95] W. Göpel, K.D Schierbaum, "SnO₂ sensors: current status and future trends", *Sensors and Actuators B*, 26-27, 1-12, (1995).
- [Götz97a] A. Götz, I. Gràcia, C. Cané, E. Lora-Tamayo. "Thermal and mechanical aspects for designing micromachined low-power gas sensors". *Journal Micromechanics and Microengineering* 7 (1997) 247-249.
- [Grac01] I. Gràcia, J. Santander, C. Cané, M.C. Horrillo, I. Sayago, J. Gutierrez, "Results on the reliability of silicon micromachined structures for semiconductor gas sensors" *Sens. Actuators B* 77 (2001) 409-415.
- [Jaeg99] M. Jaegle, J. Wöllenstein, T. Meisinger, H. Böttner, G. Müller, T. Becker, C. Bosch-v.Braunmühl, "Micromachined thin film SnO₂ gas sensors in temperature-pulsed operation mode" *Sens. Actuators B* 57 (1999) 130-134.
- [Kim01] Y. Kim, S-H. Choo, "Measurements of residual stress in the thin film micro-gas sensors containing metallic layers" *Thin Solid Films* 394 (2001) 284-291.
- [Lee96] D. Lee, W. Chung, M. Choi, J. Back. "Low-power micro gas sensor". *Sens. Actuators B* 33 (1996) 147-150.
- [Low98] H. M. Low, M. S. Tse, M. M. Chiu, "Thermal induced stress on the membrane in integrated gas sensor with micro-heater" *IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting* (1998) 140-143.
- [Microsens] Companyia Microsens. www.microsens.com
- [Mics] Companyia Micro Chemical Systems S. A. www.microchemical.com
- [Pike97] A. Pike, J. W. Gardner, "Thermal modelling and characterisation of micropower chemoresistive silicon sensors" *Sens. Actuators B* 45 (1997) 19-26.

- [Puig01] J. Puigcorb , A. Vil , I. Gr cia, C. Can , J.R. Morante, ‘Dielectric microheater for integrated sensors: an electro-thermo-mechanical analysis’ 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. TRANSDUCERS 2001. Munich. Alemanya.
- [Puig02a] J. Puigcorb , A. Vil , J. Cerd , A. Cirera, I. Gr cia, C. Can , J.R. Morante. ‘Thermo-mechanical analysis of micro-drop coated gas sensors’. Sens. Actuators A 97-98 (2002) 379-385.
- [Puig02b] J. Puigcorb , A. Cirera, J. Cerd , J. Folch, A. Cornet, J.R. Morante. ‘Microdeposition of microwave obtained nanoscaled SnO₂ powders for gas sensing microsystems’. Sens. Actuators B 84 (2002) 60-65.
- [Puig03b] J. Puigcorb , D. Vogel, B. Michel, A. Vil , I. Gr cia, C. Can , J. R. Morante, ‘High temperature degradation of Pt/Ti electrodes in micro-hotplate gas sensors’ J. Micromech. Microeng. 13 (2003) 119-124.
- [Ross97] C. Rossi, E. Scheid, D. Est ve. ‘Theoretical and experimental study of silicon micromachined microheater with dielectric stacked membranes’. Sens. Actuators A 63 (1997) 183-189.
- [Sber92] G. Sberveglieri, ‘Classical and novel techniques for the preparation of SnO₂ thin-film gas sensors’ Sens. Actuators B 6 (1992) 239-247.
- [Sber95] G. Sberveglieri, ‘Recent developments in semiconducting thin-film gas sensors’ Sens. Actuators B 23 (1995) 103-109.
- [Sber97] G. Sberveglieri, W. Hellmich, G. M ller. ‘Silicon hotplates for metal oxide gas sensor elements’. Microsyst. Technol. 3 (1997) 183-190.
- [Schr88] N. Schr der, A. Zecrenssen, ‘Sensortechnik 2000’ Prognos Weltrepart, ‘Technologieanalyse und prognose der Sensoren bis zum Jahr 2000’ Basel, Switzerland, Prognos 1988.
- [Schw96] M. Schweizer-Berberich, J. G. Zheng, U. Weimar, W. G pel, N. B rsan, E. Pentia, A. Tomescu, ‘The effect of Pt and Pd surface doping on the response of nanocrystalline tin dioxide gas sensors to CO’ Sens. Actuators B 31 (1996) 7175.
- [Shen01] L. Y. Sheng, C. De Tandt, W. Ranson, R. Vounckx, ‘Reliability aspects of thermal microstructures implemented on industrial 0.8 m CMOS chips’ Microelec. Reliability 41 (2001) 307-315.
- [Simo01] I. Simon, N. B rsan, M. Bauer, U. Weimar. ‘Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance’. Sens. Actuators B 73 (2001) 1-26.
- [Sueh93] J.S. Suehle, R. E. Cavicchi, M. Gaitan, S. Semancik, ‘Tin oxide gas sensor fabricated using CMOS micro-hotplates an in situ processing’ IEEE Electron. Device Lett. 13 (3) (1993) 118-120
- [Tagu62] N. Taguchi, Patent Japonesa 45-38200 (1962)
- [Tagu70] N. Taguchi, Patent del Regne Unit 1280809 (1970) i Patent dels Estats Units 3631436 (1970)
- [Vizv01] Zs. Vizv ry, P. F rjes, I. B rsony, ‘Thermomechanical analysis of hotplates by FEM’ Microelectronics Journal 32 (2001) 833-837.
- [Yan01] G. Yan, Z. Tang, P. C. H. Chan, J. K. O. Sin, I-M. Hsing, Y. Wang, ‘An experimental study on high-temperature metallisation for micro-hotplate-based integrated gas sensors’ Sens. Actuators B 86 (2002) 1-11.

