

MICROSSENSORES DE PRESSÃO DE SILÍCIO COM
CORREÇÃO DE ZERO REALIZADA NA PASTILHA

A.F. Beloto, H. Closs, J.A. Senna, e
S.M. de Souza

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Laboratório Associado de Materiais e
Sensores

C.P. 515 - 12201 - São José dos Campos -
SP

RESUMO

Descrevemos projeto, processo de fabricação e características preliminares de novos microssensores piezoresistivos para pressão diferencial, desenvolvidos pelo grupo de dispositivos micromecânicos de silício do INPE. Tais dispositivos são obtidos em lâminas de silício, conjugando processos convencionais de microeletrônica a técnicas de corrosão química anisotrópica, que permitem realizar pastilhas com geometrias tridimensionais mecanicamente sensíveis e monoliticamente acopladas a um circuito de transdução. Os melhoramentos incorporados ao presente sensor em relação a uma versão anteriormente desenvolvida pelo grupo, incluem otimização geométrica das difusões piezoresistivas e difusões adicionais para prover balanceamento de zero "on chip", bem como procedimetnos para alinhamento cristalográfico e entre faces da lâmina empregados com sucesso na confecção de um acelerômetro.

1. INTRODUÇÃO

Ao lado do desenvolvimento verificado na área de circuitos integrados, as duas últimas décadas deram lugar ao surgimento e a substanciais progressos na concepção e manufatura de dispositivos micromecânicos de silício, através dos quais as excelentes propriedades mecânicas desse material são exploradas em conjugação com sua bem dominada tecnologia planar para realizar sensores miniaturizados, de baixo custo e capazes de integração, na mesma pastilha, a circuitos para processamento do sinal [1].

Sensores de pressão de silício, piezoresistivos ou capacitivos, foram os primeiros de tais dispositivos a serem extensivamente estudados e a atingirem o estágio de mercado. Consistem essencialmente de uma pastilha de cujo centro material foi controladamente removido de forma a deixar apenas uma fina membrana, adequada para ser deformada e tensionada quando submetida a diferenciais de pressão dentro do intervalo de medidas desejado. Em sensores piezoresistivos, a transdução se faz através de piezoresistivos difundidos na membrana, usualmente configurando uma ponte de Wheatstone que é

então desbalanceada em resposta à pressão aplicada. Características inerentes aos processos disponíveis para corrosão química anisotrópica do silício, associadas às condições de otimização de transdução piezoresistiva, favorecem trabalhar com membranas quadradas orientadas ao longo das direções cristalográficas $\langle 110 \rangle$ de lâminas de n-Si(100), nas quais os braços piezoresistivos Si:B da ponte de Wheatstone são dispostos próximos aos centros das bordas da membrana e orientados alternadamente paralelos e perpendiculares a elas [2,3].

Assim, além de requerer alinhamento entre padrões referentes às geometrias mecânica e elétrica, a transferir a faces opostas da lâmina, a litografia empregada na confecção desses dispositivos precisa ser orientada relativamente aos eixos cristalográficos do substrato. A corrosão química anisotrópica em lâminas de silício com faces (100) impõe adicionalmente um vínculo angular entre as dimensões planares e vertical da geometria tridimensional a realizar, isto é, entre as dimensões dos padrões para mascaramento da corrosão e a espessura da lâmina. Essas características, mais aspectos relativos à manipulação e ao encapsulamento de pastilhas mecanicamente sensíveis e fragilizadas por construção, tornam o projeto e o processamento de dispositivos micromecânicos de silício não convencionais em microeletrônica.

As atividades desenvolvidas nessa área no Instituto de Pesquisas Espaciais, iniciadas em meados de 1986, levaram desde então à confecção de versões simplificadas de um sensor de pressão diferencial [4] e de um acelerômetro [5], ao primeiro dos quais o dispositivo apresentado no presente trabalho incorpora aperfeiçoamentos.

2. ETAPAS DE CORROSÃO QUÍMICA

Os sensores foram obtidos monoliticamente em lâminas de n-Si com face (100), diâmetro 1,5", espessura $300 \pm 4 \mu\text{m}$ e resistividade no intervalo 11-18 $\Omega\cdot\text{cm}$, crescidas, cortadas e polidas numa das faces pelo LME/USP. Cada lâmina compreendia 30 pastilhas de $5 \times 5 \text{ mm}^2$, 24 delas destinadas ao sensor e 6 reservadas para os alinhamentos cristalográfico e entre faces; áreas periféricas restantes da lâmi-

na continham ainda geometrias adicionais empregadas para auxiliar o alinhamento, monitorar a corrosão química e guiar o corte e separação das pastilhas.

Uma mistura de KOH (Merck 5033), álcool isopropílico (Merck 21504) e água deionizada ($\sim 3-5M\Omega$), com proporções em massa respectivamente 5:4:11 mantidas por condensação em uma espira de aço inox resfriada a água, aquecida a $77,8 \pm 0,2^\circ C$ e renovada na superfície de ataque da lâmina (orientada verticalmente em suporte de teflon) por meio de agitador magnético, foi empregada para dissolver anisotropicamente em média $0,93 \mu m/min$ de Si (100) mascarado por SiO_2 , térmico litografado convencionalmente.

Duas etapas preliminares de corrosão precederam aquela, visando à obtenção das membranas, ambas aplicadas à face polida da lâmina, e destinadas respectivamente aos alinhamentos cristalográfico e entre faces. Na primeira, o acabamento observado em conjuntos de canais-V estreitos ($40 \times 2000 \mu m^2$ na superfície) com orientação angular varrendo em passos de $0,5^\circ$ um intervalo de $\pm 5^\circ$ em torno de uma direção de referência alinhada paralelamente ao chanfro da lâmina, permitia corrigir eventuais desvios deste em relação ao eixo (110), que na prática não excederam $\pm 1,5^\circ$. O padrão da etapa de corrosão seguinte era alinhado com a orientação selecionada e previa conjuntos de furos para alinhamento entre padrões transferidos às duas faces em fotoalinhadora convencional. As dimensões desses furos foram estabelecidas para permitir alinhamento melhor do que $5 \mu m$ em lâminas com espessura desviando de $300 \mu m$ em até $\pm 10 \mu m$. Molduras quadradas formadas por canais-V orientados com $\langle 110 \rangle$ e conectados em suas extremidades foram também obtidos durante essa segunda corrosão preliminar; suas larguras - e portanto profundidade em (100) - foram estabelecidas de forma que a corrosão seguinte (a partir da face não polida), através de janelas alinhadas às molduras, liberasse as mesas centrais quando o plano de corrosão alcançasse distâncias da face polida especificadas para monitorar a taxa de ataque e sinalizar sua interrupção com espessuras de membrana pré-determinadas. Canais-V $\langle 110 \rangle$ rasos próximos às bordas de lâmina foram incluídos, destinados a alinhar o corte para separação das pastilhas. A fragilização das linhas de separação por canais-V profundos, ou mesmo sua associação à corrosão de obtenção das membranas, visando destacar as pastilhas na espessura de membrana desejada, não foram praticadas por imporem a obtenção das membranas como última etapa de processamento, e portanto dependente de procedimentos adicionais para proteção do metal (Al) e óxidos finos à corrosão química.

Na terceira e última operação de corrosão química, as membranas foram obtidas por ataque através de janelas quadradas no óxido da

face não polida, cujos lados ($2870 \mu m$) foram definidos para conduzir a uma razão aproximada $1/(125)^2$ entre os quadrados da espessura e do lado para membranas com $20 \mu m$ de espessura ou, opcionalmente, ao dobro e quádruplo daquela relação em membranas com espessuras respectivamente de 28 e $40 \mu m$, valores também incluídos nas geometrias destinadas ao monitoramento de final da corrosão.

Defeitos apresentados pelas máscaras de alta resolução, produzidas originalmente a partir de arte final em rubilite, com ampliação de 20X para os três níveis de corrosão, é de 100X para os demais (difusões de boro e de fósforo, janelas de contato e padrão de metalização), determinaram a substituição de todos os níveis por fotoreduções simples de arte final gerada em foto-plotter com ampliação de apenas 10X, pouco adequada à precisão dimensional requerida pelo projeto. Adicionalmente, a diluição rápida dos planos (212), só agora compensada em novas máscaras, impediu o teste das geometrias destinadas ao monitoramento da espessura de membrana nas primeiras lâminas processadas.

3. DIFUSÕES PIEZORESISTIVAS

Os braços piezoresistivos da ponte de Wheatstone foram desenhados (Fig.1) de forma a situar os elementos de corrente paralela e perpendicular a $\langle 110 \rangle$ em segmentos mecanicamente equivalentes da membrana, restritos a uma pequena área (menos de $7 \times 10^4 \mu m^2$) próxima ao centro das bordas laterais, onde a tensão mecânica é máxima, e com geometria escolhida para aproximar uma configuração cuja simetria só fosse quebrada pela direção da corrente elétrica. Cada braço é formado por sete segmentos paralelos de comprimento $260 \mu m$ e largura $20 \mu m$, separados de $20 \mu m$ e alternadamente interligados em suas extremidades por difusões largas; o quadrado de $260 \times 260 \mu m^2$ onde se inscrevem os segmentos úteis de cada braço piezoresistivo foi alinhado em relação ao padrão de obtenção da membrana de forma a ter seu lado mais próximo à borda dela distanciado desde $20 \mu m$, em membranas com espessura de $40 \mu m$, até $6 \mu m$ em membranas com espessura de $20 \mu m$. Abaixo de $30 \mu m$, a precisão de alinhamento entre as geometrias mecânica e elétrica pode ser verificada a posteriori, por inspeção da lâmina pronta em microscópio óptico, aproveitando a transmissão parcial através da membrana (Fig.2).

Como a simetria das difusões e janelas de contato nos nós da ponte de Wheatstone é imperfeita devido a flutuações da dopagem e das dimensões dos elementos piezoresistivos, ela não assegura por si só o equilíbrio da ponte com membrana relaxada. Por isso, optamos por substituir dois nós opostos por resistores ajustáveis difundidos simultaneamente com os elementos transdutores. Cada

um desses resistores é constituído por associações em série e em paralelo (Fig.3) da 2^n , $n = 0$ a 4, elementos unitários com comprimento e largura planares efetivos (entre janelas de contato) respectivamente de 30 e 220 μm , intercaladas por trilhas metálicas que permitem adicionar à resistência de um dos braços convergentes uma correção variável de 0 a aproximadamente 2% de seu valor, com resolução melhor do que 0,1%, interligando algumas dessas trilhas quando da conexão elétrica da pastilha aos terminais de operação do sensor. A pouca redução de sensibilidade causada pela inserção à ponte de resistências relativamente pequenas localizadas fora da membrana é amplamente compensada pela maior estabilidade térmica proporcionada pela correção de zero através de resistores de mesma natureza e residentes na pastilha. O espaço restante da área não deformável ao redor da membrana foi destinado à caracterização da difusão de boro por quatro pontas, ao contato ôhmico com o substrato para caracterização das junções e polarização reversa da ponte, e à medida de resistência de um elemento da ponte repetido fora da membrana. A deposição de boro foi realizada no LME/USP, a 925°C por 20 min, seguida da penetração a 1100°C por 150 min, que produzem tipicamente uma concentração superficial de $2,7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ e uma profundidade de junção de 2,4 μm . A deposição de fósforo foi realizada a 900°C durante 8 min. Finalmente, contatos e trilhas de Al com espessura em torno de 1 μm foram evaporados a vácuo e recozidos a 450°C por 30 min.

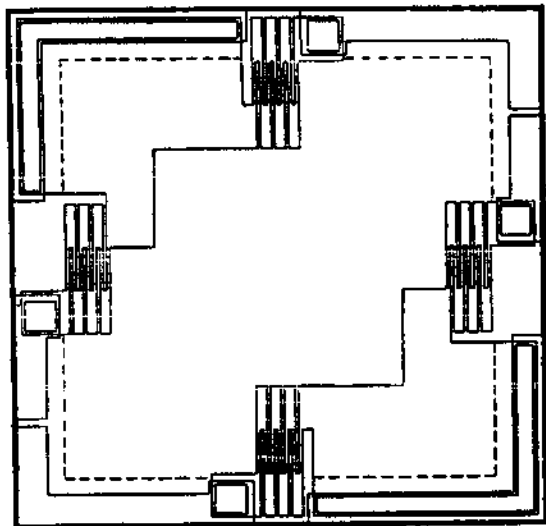


Fig.1 - Centro do layout de uma pastilha, mostrando a disposição dos elementos piezoresistivos sobre a membrana (indicada pela linha tracejada; as linhas cheias são os contornos, superpostos na figura, correspondentes aos níveis de difusão de boro, janelas de contato e padrão de metalização).



Fig.2 - Vista parcial de lâmina processada, com luz incidindo na cavidade de um dos chips.



Fig.3 - Fotomicrografia com detalhe das associações em série e em paralelo de difusões destinadas ao balanceamento da ponte piezoresistiva.

4. ENCAPSULAMENTO

Sensores micromecânicos demandam encapsulamento dedicado, em função de seu princípio de funcionamento e de sua adequação a padrões de acoplamento ou condições ambientais específicos. Por se tratar de protótipo cujo desenvolvimento não se vinculava a uma aplicação pré-determinada, optamos por uma versão diferencial para uso em meio não corrosivo, envolvendo apenas infraestrutura de oficina mecânica e para confecção de circuitos impressos, apropriada à realização imediata da caracterização preliminar apresentada neste trabalho.

Após a separação das pastilhas com serra circular (no Instituto de Microeletrônica do CTI), cada dispositivo foi colado em epoxi a

uma base (Fig. 4) composta por uma placa de circuito impresso com trilhas para conector edge de 0,1", e por uma pastilha de silício de mesmas dimensões que o sensor, entre as quais em algumas montagens foi interposta uma pastilha de cerâmica, todos colados com epoxi e alinhados por um furo para transmissão da pressão à cavidade do sensor. Os leitões de cerâmica (substratos AlSiMag, espessura 0,6 mm, cortados em 8 x 8 mm² e perfurados) e silício (pastilhas obtidas por corrosão anisotrópica através de um oitavo nível constando apenas de furos quadrados e canais-V para separação por clivagem) destinam-se à blindagem de dilatações térmicas diferenciais entre o sensor e a placa, e sua substituição por um polímero elástico está em testes. As conexões na pastilha do sensor e entre seus terminais e as trilhas da placa foram executadas com fio de Al de 25 µm de diâmetro em soldadora por ultrassom (Unitek 8-151-01), e o conjunto colado com epoxi à base da cápsula (feita de alumínio anodizado ou PVC), estágio em que a deflexão da membrana quando submetida a diferenciais de pressão pode ser vista (Fig. 5). Nesta versão, o acoplamento mecânico ao sensor se faz através de terminais cilíndricos com diâmetro externo de 6 mm para adaptação de tubo.

5. RESULTADOS PRELIMINARES

Três lâminas, correspondentes a espessuras de membrana em torno de 28, 34 e 40 µm foram produzidas inicialmente para avaliar o projeto e todas as etapas de confecção; à exceção da difusão de fósforo para contato com o substrato, realizada apenas na última delas, todas foram submetidas simultaneamente aos demais processos térmicos. Problemas ainda não explicados à época da redação deste trabalho compromete-

ram essa caracterização preliminar: os dispositivos apresentaram contatos altamente resistentes e parcialmente retificadores nas difusões transdutoras, e abertos naquelas destinadas ao balanceamento da resposta à pressão diferencial nula. Os contatos com as difusões piezoresistivas, de maior área, responderam parcialmente a novos recozimentos em vácuo, realizados com os dispositivos das duas primeiras lâminas, que já haviam sido separadas em pastilhas individuais. Na lâmina com dispositivos de 40 µm, ainda litografável, o defeito persistiu parcialmente após a remoção do metal, reabertura das janelas de contato monitorada ao microscópio por condensação de umidade, nova evaporação de Al e recozimento para formação de liga, mas esse procedimento permitiu que se acessasse o circuito para ajuste de zero.

Novas lâminas estão ainda sendo processadas, e os presentes resultados limitam-se às respostas à pressão apresentadas tipicamente por dispositivos com diferentes espessuras de membrana (Fig. 6), quando descartados os offsets a pressão nula; o eixo positivo das pressões corresponde a pressão líquida aplicada à face contendo os circuitos, o negativo à pressurização da cavidade do chip. As sensibilidades vão de 0,25 mV/mmHg nos dispositivos com 40 µm até 0,48 mV/mmHg naqueles com 28 µm, para 5V de polarização da ponte, com resposta linear a menos de 1% em faixas de pressão respectivamente de 800 a 400 mmHg assimétricas em torno de pressão diferencial nula, isto é, das quais 75% correspondem a pressão líquida aplicada à face difundida do chip.

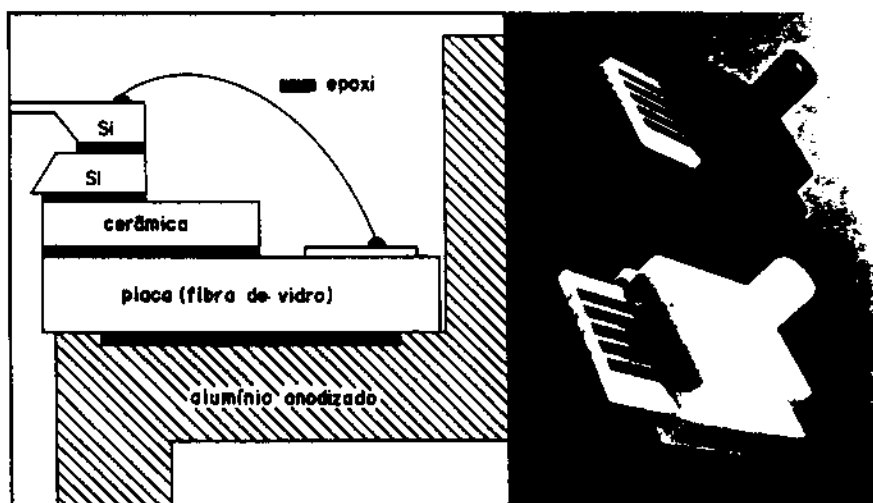


Fig.4 - À esquerda, representação esquemática da montagem do sensor; à direita, dispositivos encapsulados em alumínio anodizado e em PVC.



Fig. 5 - Cápsula aberta, mostrando deformação da membrana quando submetida a uma pressão líquida sobre a face difundida do chip.

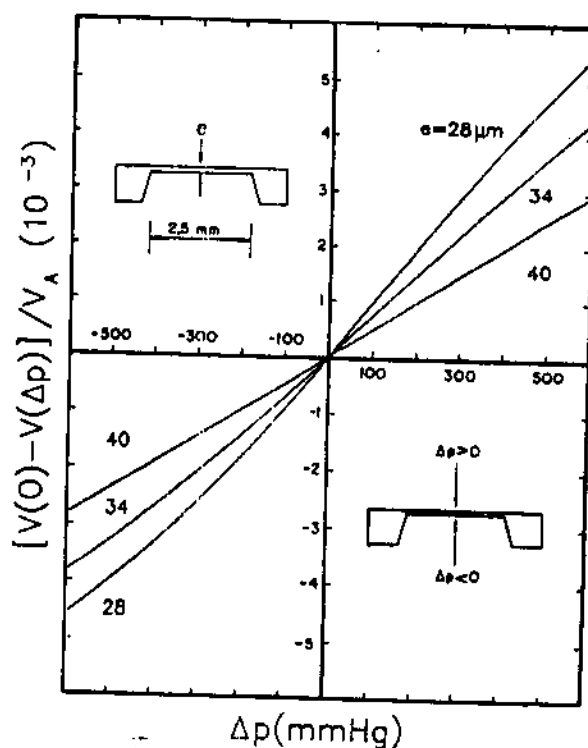


Fig. 6 - Resposta elétrica obtida com as primeiras lâminas processadas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao pessoal do LME/USP, LED/UNICAMP e CTI pelo uso de suas instalações em algumas etapas do processamento. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo PADCT/SINST-01 e, recentemente, pela FAPESP.

7. REFERÊNCIAS

1. PETERSEN, E.Kurt. Proc. of the IEEE, vol. 70, 420-457, 1982.

2. BEAN, E.Kenneth. IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-25, p. 1185-1193, 1978.
3. CLARK, Samuel K. and WISE, Kensall D., IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-26, p. 1887-1896, 1979.
4. BELOTO, A.F.; CLOSS, H.; CUNHA, S.P. da; SENNA, J.A. e SENNA, J.R. Anais do III Congresso da SBMicro, p. 158-165, 1988.
5. BELOTO, A.F.; CLOSS, H.; SENNA, J.A.; SENNA, J.R. e SOUZA, S.M. de. Anais do X CBRAVIC, 1989.