



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFCG-UFPE

ASPECTOS DE FUNCIONAMENTO E FABRICAÇÃO DO GIROSCÓPIO A ONDAS ACÚSTICAS DE SUPERFÍCIE

Gilson J. Da Silva Jr – gilsonjr@gmail.com

Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas

Departamento de Eletrônica e Sistemas

Universidade Federal de Pernambuco.

Cid. Universitária, 50670-000 - Recife -PE

Edval J. P. Santos – edval@ee.ufpe.br

Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas

Departamento de Eletrônica e Sistemas

Universidade Federal de Pernambuco.

Cid. Universitária, 50670-000 - Recife -PE

Resumo: *Giroscópios são dispositivos utilizados para orientação de aviões, foguetes, satélites, sondas espaciais em vôo. Neste trabalho são apresentados o princípio de funcionamento de um giroscópio e as etapas de fabricação do mesmo, utilizando osciladores e sensores a ondas acústicas de superfície (OAS). A detecção da inclinação pode ser feito através da força Coriolis que aparece naturalmente quando um plano contendo uma massa giratória sofre uma rotação constante no seu eixo. O giroscópio pode ser fabricado de forma similar a um dispositivo OAS, que tem baixa complexidade de fabricação, o que tornaria seu custo bastante reduzido.*

Palavras-chaves: Giroscópio, Fabricação, Coriolis, Ondas Acústicas

1. INTRODUÇÃO

O giroscópio é um dispositivo que mede a inclinação de um objeto em relação a um eixo definido. É um dispositivo de extrema importância na fabricação de foguetes, satélites, sondas espaciais, aplicações marítimas e outros. Existem diversas tecnologias para fabricação de giroscópios, entre elas pode-se citar: MEMS, LASER, etc [QU et al (2004), ARMENISE et al (2003) e KUROSAWA (1998)]. Recentemente, vem sendo pesquisada a construção de giroscópios utilizando dispositivos a ondas acústicas de superfície, OAS [JOSE et al (2002)]. Neste trabalho, JOSE et al (2002), propuseram a utilização de pontos metálicos nos anti-nós das ondas elásticas de superfície para servir de massa de referência para um giroscópio. Pode-se demonstrar que o deslocamento em um anti-nó da superfície elásticas, no modo Rayleigh de propagação, é de forma elíptica, significando que uma massa nessa região deverá se mover também de forma elíptica.

Com simples modificação na estrutura do dispositivo, pode-se criar um giroscópio utilizando a tecnologia dos osciladores e dos sensores OAS. O processo de fabricação é o mesmo de um sensor OAS, simples e de baixo custo.

Para um giroscópio OAS faz-se necessário o uso de um oscilador OAS estável e um sensor OAS. Os dispositivos OAS se baseiam na transformação do sinal elétrico em ondas elásticas de superfície e da transformação dessas ondas novamente em sinal elétrico através do efeito piezoelétrico [SANTOS (2005)].

Este trabalho está dividido em cinco partes, sendo essa introdução a primeira, em seguida é apresentado o princípio de funcionamento do dispositivo OAS. Na terceira parte é discutido como a força de Coriolis pode ser utilizada na determinação da orientação. Na quarta parte tem-se o processo de fabricação e finalmente na última parte são feitas as considerações finais.

2. DISPOSITIVOS A ONDAS ACÚSTICAS DE SUPERFÍCIE

De forma geral, estes dispositivos consistem de estruturas interdigitadas (IDT) sobre um substrato piezoelétrico que funcionam como um transdutor de sinais elétricos em ondas acústicas de superfície e vice versa. Cada estrutura IDT consiste de dois pentes, com dentes intercalados.

2.1 Princípio de funcionamento

Para se formar uma onda elástica em um material piezoelétrico, faz-se necessário a aplicação de uma onda de potência. Próximo da região central do início da estrutura IDT, assim como mostra a geometria da Figura 1, teremos o potencial da Figura 2, para um instante fixo.

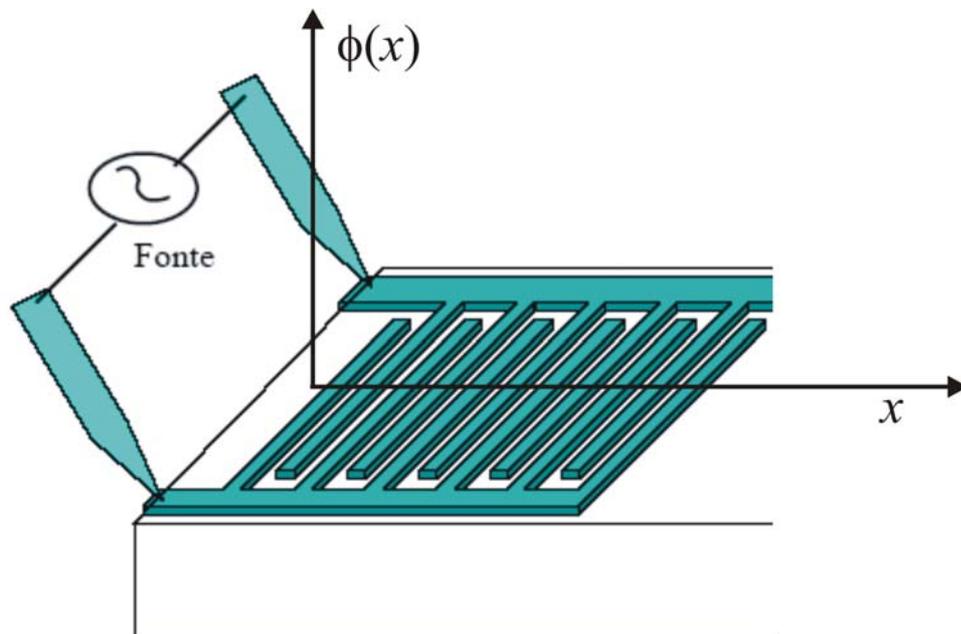


Figura 1 – Geometria para as ondas de potencial elétrico gerada pela estrutura IDT.

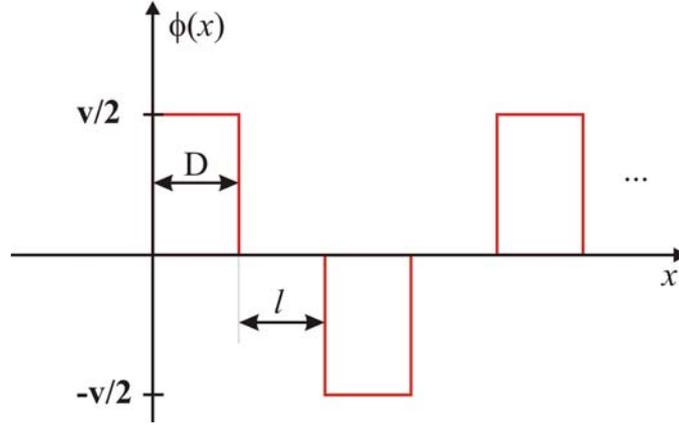


Figura 2 – Potencial elétrico em função de x no interior da estrutura IDT.

Para este instante fixo, podemos decompor este sinal em infinitas ondas da seguinte forma:

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(V, k) e^{jkx} dk \quad (1)$$

$$F(V, k) = \int_0^D \frac{V}{2} e^{-jkx} dx - \int_{D+l}^{2D+l} \frac{V}{2} e^{-jkx} dx + \dots = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \frac{V}{2} \int_{n(D+l)}^{n(D+l)+D} e^{-jkx} dx \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) são a decomposição de Fourier do sinal espacial em um tempo fixo, desenvolvendo a Equação (2), após algumas manipulações, chega-se a:

$$F(V, k) = \frac{V e^{-\frac{jkD}{2}}}{k} \operatorname{sen}\left(\frac{kD}{2}\right) \frac{1 - (-1)^N e^{-jkN(D+l)}}{1 + e^{-jk(D+l)}} = V \cdot H(k) \quad (3)$$

Podemos escrever o potencial da seguinte forma:

$$\Phi(x) = \frac{V}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(k) e^{jkx} dk \quad (4)$$

Para V variável no tempo, sendo um co-seno de velocidade angular ω ($V = V_a \cos(\omega t)$), após algumas manipulações, chegamos a seguinte expressão de onda de potencial.

$$\Phi(x, t) = \frac{V_a}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[e^{j(kx + \omega t)} + e^{j(kx - \omega t)} \right] H(k) dk \quad (5)$$

Da equação (3), observamos que:

$$H(k) = \frac{e^{-\frac{jkD}{2}}}{k} \operatorname{sen}\left(\frac{kD}{2}\right) \frac{1 - (-1)^N e^{-jkN(D+l)}}{1 + e^{-jk(D+l)}} \quad (6)$$

A Equação (5) é uma integral de infinitas ondas de potencial elétrico se deslocando para esquerda e para direita com mesma amplitude, isto é, ondas estacionárias. O que mostramos é que a estrutura IDT, quando nela aplicada um potencial variável no tempo, comporta-se como ondas estacionárias de potencial elétrico. Estas ondas de potencial induzem ondas elásticas sobre o material piezoelétrico que iram se propagar até a outra estrutura IDT.

Porém, características elásticas do material piezoelétrico fazem com que este se comporte como um filtro de velocidade de onda, ou seja, existe uma velocidade de propagação intrínseca do material v_{saw} na qual a perda é muito menor nela que nas demais [SANTOS (2005)]. Essa é a característica essencial do dispositivo OAS que faz com que o mesmo tenha uma banda bem definida de frequência.

O pico de $|H(\mathbf{k})|$ esta na frequência da estrutura IDT em relação à x , o que determina o comprimento de onda principal. Logo teremos como frequência de operação:

$$f_0 = \frac{v_{saw}}{2(D+l)} \quad (7)$$

Existem modelos elétricos dos dispositivos OAS baseados na teoria dos modos acoplados, [SANTOS (2005)] e [JOSE et al (2002)], o que facilita a simulação dos mesmos próximo da frequência de operação.

3. FORÇA CORIOLIS EM UM GIROSCÓPIO

Seja uma partícula de massa m girando em torno de um ponto \mathbf{o} a uma distância de ρ em um plano π paralelo a \mathbf{y} que contem \mathbf{o} e forma um ângulo θ com o plano \mathbf{xoy} , como mostra as Figuras 3 e 4.

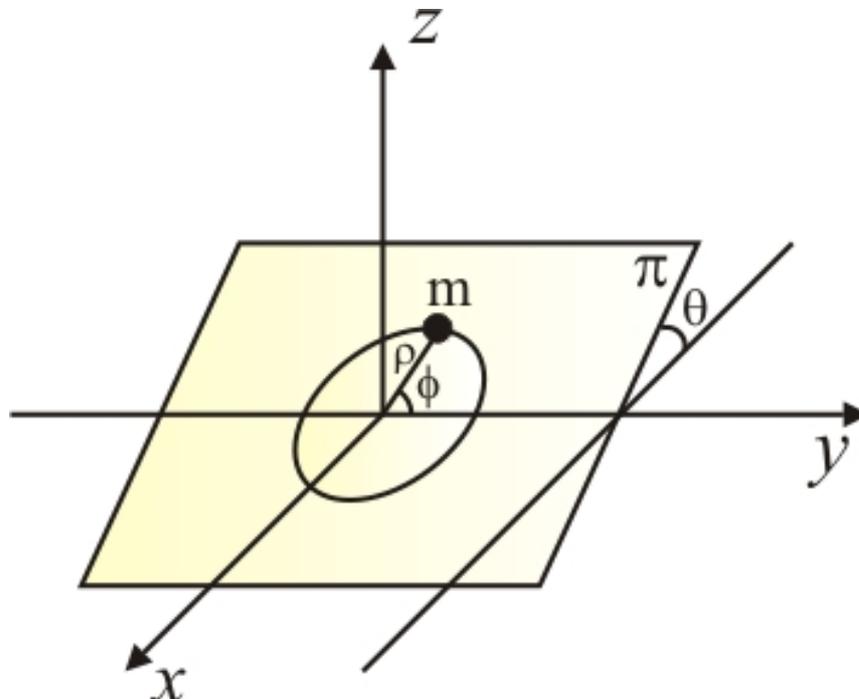


Figura 3 – Geometria em perspectiva para a solução da força Coriolis no giroscópio OAS.

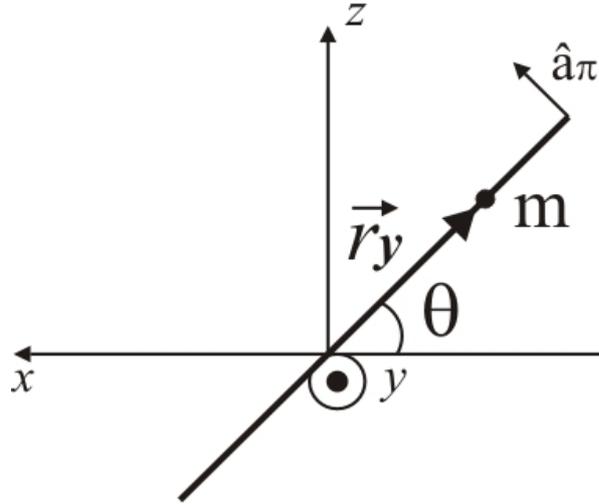


Figura 4 – Geometria do plano π de perfil.

Podemos parametrizar a posição da partícula da seguinte forma:

$$\vec{X} = \rho(-\sin\phi \cos\theta \cdot \hat{a}_x + \cos\phi \cdot \hat{a}_y + \sin\phi \sin\theta \cdot \hat{a}_z) \quad (8)$$

Sendo ϕ agora uma função do tempo, o que significa que a nossa massa de referência gira em torno de \mathbf{o} no plano π com velocidade constante de ω . Teremos a equação do movimento dada por:

$$\vec{X}_0(t) = \rho(-\sin(\omega t) \cos\theta \cdot \hat{a}_x + \cos(\omega t) \cdot \hat{a}_y + \sin(\omega t) \sin\theta \cdot \hat{a}_z) \quad (9)$$

Calculando a aceleração derivando a posição duas vezes, temos:

$$\vec{A}_R = \frac{d^2 \vec{X}_0(t)}{dt^2} = -\rho \omega^2 \vec{X}_0(t) = \vec{A}_{C\phi} \quad (10)$$

O que obviamente resultaria na aceleração centrípeta devido à rotação em ϕ , o que diz que a única força atuante em \mathbf{m} é a força centrípeta, não havendo, portanto, forças normais ao plano π .

Vamos supor agora que uma força externa faça o plano π gira em torno de \mathbf{y} , ou seja, o ângulo θ varia com o tempo com velocidade angular de Ω . Teremos uma nova equação do movimento dada por:

$$\vec{X}_\Omega(t) = \rho(-\sin(\omega t) \cos(\Omega t) \cdot \hat{a}_x + \cos(\omega t) \cdot \hat{a}_y + \sin(\omega t) \sin(\Omega t) \cdot \hat{a}_z) \quad (11)$$

Para achar a aceleração resultante é preciso derivar duas vezes a Equação (11), utilizando a regra da cadeia e após várias manipulações, chegamos a:

$$\frac{d^2 \vec{X}_\Omega(t)}{dt^2} = -\rho \omega^2 \vec{X}_\Omega(t) - \rho \Omega^2 \vec{r}_{y\Omega}(t) + 2\rho \omega \Omega \cos(\omega t) (\sin(\Omega t) \cdot \hat{a}_x + \cos(\Omega t) \cdot \hat{a}_z) \quad (12)$$

O primeiro termo da Equação (12) é a aceleração centrípeta pela rotação em ϕ , que é paralela ao plano π , o segundo termo é a aceleração centrípeta da partícula em relação à rotação de θ que também é paralela a π , já o terceiro termo é normal a π e é denominado de aceleração Coriolis. Dessa forma podemos dizer que existe uma força aplicada a massa m que é normal ao plano π e que é denominada de força Coriolis, proporcional a velocidade linear da massa v e velocidade angular de rotação do dispositivo Ω .

$$\overrightarrow{F}_{cor} = 2\rho\omega\Omega m \cos(\omega t) \cdot \hat{a}_\pi \quad (13)$$

$$\rho\omega = v \Rightarrow \overrightarrow{F}_{cor} = 2v\Omega m \cos(\omega t) \cdot \hat{a}_\pi \quad (14)$$

3.1 Uma massa m em um oscilador OAS

Observando a geometria do oscilador OAS na Figura 3, podemos afirmar que surgirá uma força normal ao plano de giro da partícula e estará presente sobre o substrato piezoelétrico.

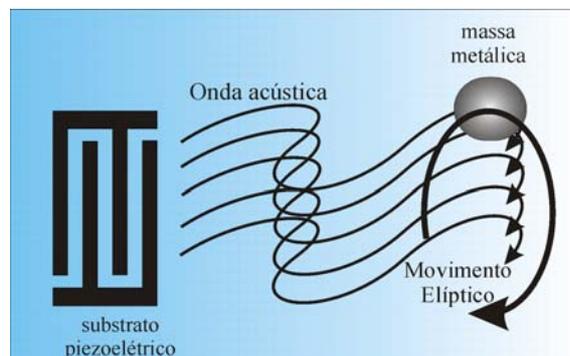


Figura 5 – Movimento elíptico de uma massa metálica em um oscilador OAS.

A força Coriolis irá gerar uma outra onda elástica que se propagará no sentido perpendicular ao da onda gerada pelo oscilador OAS e que é diretamente proporcional a Ω . Para completar o giroscópio, precisamos de um sensor OAS posicionado adequadamente para receber esta onda e transformá-la em sinal elétrico.

Dessa forma, o giroscópio OAS pode ser projetado sobre a seguinte geometria, apresentada na Figura 6:

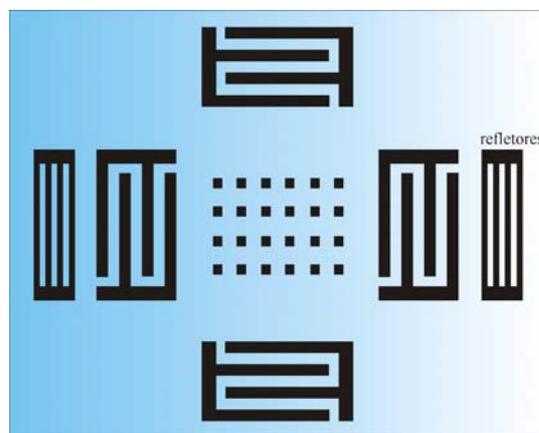


Figura 6 – Formato modelo de um giroscópio OAS.

Como se pode observar, as estruturas IDTs do oscilador devem conter refletores para estabilizar a frequência de operação f_0 , e suas separações devem ser metade das separações das IDTs do oscilador OAS. Pontos metálicos são apenas pequenas regiões de metal não corroídas. Os pontos metálicos devem ser colocados nos anti-nós da onda elástica, pois nessa região tem-se o maior deslocamento ρ . Para um melhor acoplamento eletro-mecânico, é sugerido por JOSE et al (2002) um substrato de neonato de lítio ($128YX \text{ LiNbO}_3$).

Para que o dispositivo funcione, faz-se necessário retirar as informações do sensor OAS transversal. Este sinal pode ser amplificado e demodulado, utilizando um demodulador AM balanceado com o próprio sinal do oscilador OAS. A informação demodulada nos fornece a aceleração angular do giro. Se o sinal desejado for a inclinação angular, pode-se utilizar um integrador após o demodulador. O sinal final também poderia ser digitalizado para aquisição de dados. Um diagrama em bloco do giroscópio OAS em operação pode ser visualizado na Figura 7.

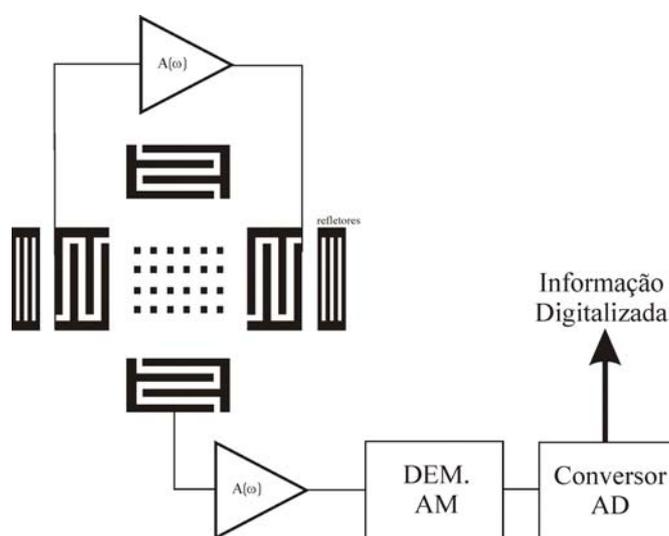


Figura 7 – Diagrama em bloco de funcionamento do giroscópio OAS.

O objetivo é construir um dispositivo que informe a inclinação ou aceleração angular de um eixo de referência. Dessa forma, toda a parte do oscilador e sensor OAS, bem como os amplificadores, demodulador, integrador e até o conversor AD, podem estar integrados num mesmo chip. Este chip pode fornecer a inclinação ou rotação do dispositivo em relação a um eixo. Um exemplo pode ser visualizado na Figura 8. Na figura 9 temos o dispositivo feito em uma ferramenta para desenvolvimento de circuito integrado.

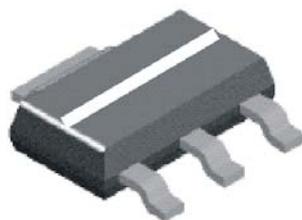


Figura 8 – Possível encapsulamento para o giroscópio OAS.

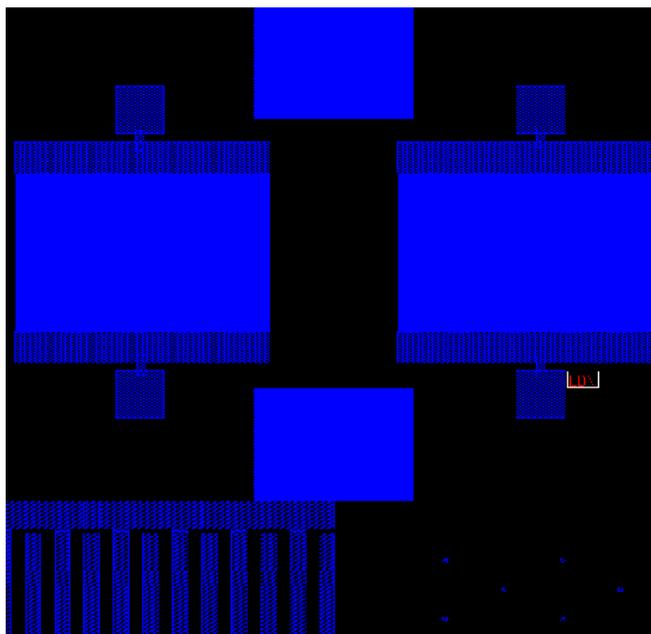


Figura 9 – Dispositivo projetado em uma ferramenta de desing de circuito integrado, ampliação da imagem mais abaixo.

4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Assim como na fabricação de dispositivos OAS, as IDTs do dispositivo ficam localizadas na mesma face do cristal. Isso faz com que esse tipo de dispositivo possa ser fabricado com as mesmas técnicas de fabricação da microeletrônica conhecida como tecnologia planar. Os sensores OAS são projetados para operar na faixa de 100 a 500 MHz. Nessa faixa a tecnologia de microeletrônica a ser utilizada não precisa ser muito sofisticada, uma vez que a dimensão crítica é maior que $1\mu m$, [SANTOS (2005)].

O processo de fabricação envolve apenas um único processo de Litografia sobre o substrato piezoelétrico. Um processo de fabricação de um sensor OAS é mostrado na Figura 10, logo abaixo:

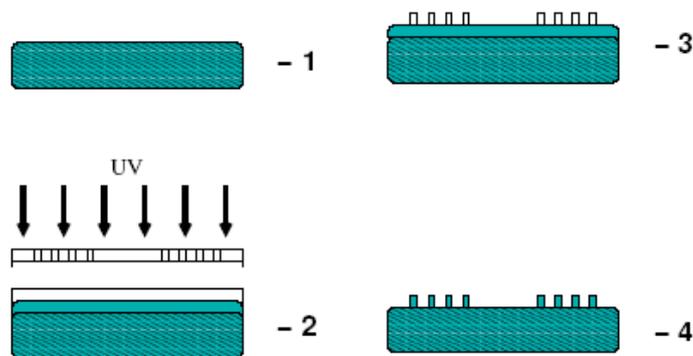


Figura 10 - Exemplo de etapas de fabricação [SANTOS (2005)].

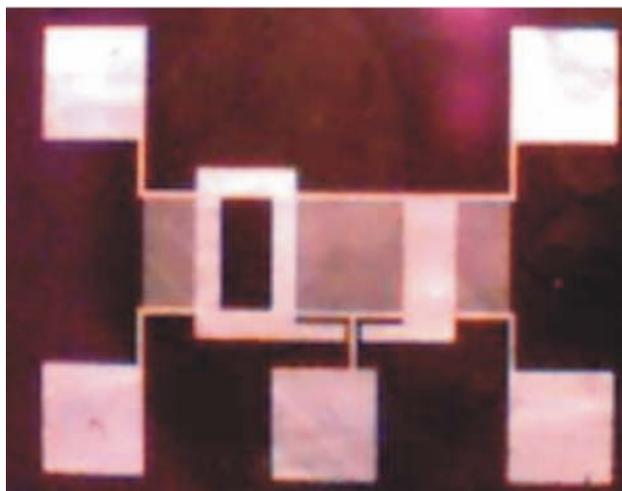


Figura 11 - Exemplo de um sensor OAS fabricado na sala limpa do Laboratório de Dispositivos e Nanoestrutura da UFPE [SANTOS (2005)].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse documento apresentamos de forma resumida o funcionamento de dispositivos OAS e como utiliza-los na fabricação de um giroscópio. Também foi abordado o processo de fabricação do dispositivo OAS planar, utilizado também para a fabricação do giroscópio.

O processo de fabricação é bastante simples, assim como o processo de fabricação de qualquer dispositivo OAS planar, o que possibilita um baixo custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

QU, H.; FANG, D.; SADAT, A.; YUAN, P.; XIE, H. High-resolution Integrated Micro-gyroscope for Space Applications, **41st Space Congress**, April 27-30, 2004, Cape Canaveral, Florida.

ARMENISE, M. N.; CIMINELLI, C.; LEONARDIS, F. De; DIANA, R.; PASSARO, V.; PELUSO, F. Gyroscope technologies for space applications, **ESA-ESTEC IOLG PROJECT**, Politecnico di Bari, Via Orabona n.4, 70125 Bari, Italy, 2003.

KUROSAWA, M.; FUKUDA, Y.; TAKASAKIA, M.; HIGUCHI, T. A surface-acoustic-wave gyro sensor, **Sensors and Actuators A** 66 (1998) 33-39.

JOSE, K. A.; SUH, W. D.; XAVIER, P. B.; VARADAN, V. K.; VARADAN, V. V. Surface acoustic wave MEMS gyroscope, **Wave Motion** 36 (2002) 367 – 381.

SANTOS, E. J. P., *in* Sensores: **Tecnologias e Aplicações**, Vol I, capítulo 5 "Sensores a Ondas Acústicas de Superfície", Editado por J. C. Adamowski, ISBN: 85-86686-30-1, São Paulo (2005).

Abstract: Gyroscopes are devices used for orientation of airplanes, space rockets, satellites, sounding leads in flight. In this work the principle of gyroscope functioning and your manufacture stages are presented, using oscillators and sensors by surface acoustics waves (SAW). The detention of the inclination can be made through the Coriolis force that appears of course when a plan that contend a revolving mass suffers a constant rotation in its axle. The gyroscope can be manufactured of similar form to a SAW device, which has low manufacture complexity, what it would become its sufficiently reduced cost.

Key-words: Gyroscope, Manufacture, Coriolis, Acoustic waves