

Sistema Sensor de Gases SAW empregado como medidor de Concentração de Acetona e Álcoois.

Edmilson R. Braga, Alberto Y. Nakano, Maurício P. da Cunha

Resumo ? Este trabalho apresenta um sistema sensor químico de gases que emprega ressoadores a Ondas Acústicas Superficiais (“Surface Acoustic Waves, SAW”). O sistema projetado e implementado anteriormente é formado por dois osciladores SAW duais, denominados de referência e sensor, conectados por intermédio de filtros a um misturador para a detecção da diferença dos sinais. O presente trabalho discute o funcionamento do sistema sensor SAW empregado na detecção de vapores de acetona e Álcoois. A deposição do filme sensor de acetato de celulose também são reportadas. O elemento ressoador SAW com filme depositado é caracterizado em função da temperatura e umidade. O sistema sensor montado é caracterizado em temperatura e umidade em uma câmara climática, e empregado para análise de concentração de álcoois e derivados de acetona a partir do sistema de injeção líquida em uma câmara de gases.

Palavras-chaves ? Sensor Ressoador SAW, Acetato de Celulose, Sensibilidade, Concentração de álcoois.

I. INTRODUÇÃO

Tem-se verificado, nas últimas décadas, um crescente interesse no estudo sobre a detecção de gases tendo em vista o melhoramento das técnicas de monitoramento ambiental, da economia de fontes energéticas e materiais, e de facilitar e otimizar os processos de diagnóstico médico, entre outros [1-8].

Neste escopo, vários tipos de sensores de grande e médio porte foram desenvolvidos pela indústria, podendo ser citados como exemplo os espectrômetros de massa e os cromatógrafos de gases. Estes equipamentos são muito precisos, porém são de grande porte, limitando-se sua utilização ao próprio local onde estão instalados, não possuindo a versatilidade de serem facilmente transportados e utilizados em campo, além de requererem um grande conhecimento específico para a sua operação e possuírem elevados preços de mercado [2, 3, 5].

Com a necessidade de se reduzir custos de fabricação destes sistemas, mantendo ou melhorando a qualidade dos instrumentos de detecção ou medição de gases, vários projetos de pesquisa, utilizando a tecnologia de fabricação de circuitos integrados, foram desenvolvidos com o objetivo de construir sensores de gases mais precisos e sensíveis, portáteis, e a preços populares [9].

Mercê dos avanços da tecnologia dos materiais e do alto grau de compactação, utilizado nos processos de fabricação e medição em microeletrônica, na tecnologia de circuitos de larga escala de integração (VLSI), grandes progressos foram obtidos na instrumentação analítica [9, 10].

A partir de 1979, H. Wohltjen e R. Dessey da Virgínia Tech descreveram o uso dos dispositivos de ondas acústicas para a detecção química. Desde então, vários grupos de pesquisa começaram a desenvolver sensores químicos de gases utilizando esta nova técnica [11-22]. Estes sensores químicos possuem tamanhos reduzidos e são simples quando comparados aos elementos sensores convencionais, o que possibilita o seu uso em equipamentos portáteis. Estes dispositivos possuem uma grande faixa de detecção de diferentes espécies gasosas.

Este trabalho tem por objetivo de:

Projetar e construir um oscilador a ressoador SAW como elemento de controle de frequência; Adaptar o projeto realizado a um segundo oscilador a ressoador SAW, este submetido à deposição de um filme sensor; Utilizar os dois osciladores projetados e fabricados, na montagem de um sistema sensor de gases a SAW; Caracterizar o sistema sensor a SAW para umidade e álcoois.

Através do trabalho de desenvolvimento de um sistema sensor a ressoador SAW para detecção de gases, procurou-se, primeiramente, adquirir conhecimento a respeito do funcionamento dos dispositivos e sistema sensor SAW na detecção de gases. Buscou-se, em seguida, projetar e implementar os circuitos osciladores SAW, filtros RLC, para a rejeição de espúrios da saída dos osciladores e misturador; e sistemas de aquisição de dados, para a caracterização do sistema sensor SAW de gases proposto, visando à construção de um sistema leve, robusto, portátil, capaz de detectar baixos níveis de concentração gasosa, necessários à grande demanda de mercado.

Para ser possível implementar o sistema sensor SAW foi necessário: Caracterizar e verificar o comportamento elétrico dos dispositivos ressoadores SAW, disponíveis no laboratório de microeletrônica da EPUSP, tais como: perda de inserção, banda e espúrios relativos à variação de temperatura e umidade; Realizar o estudo e projeto de circuitos osciladores ressoadores SAW, estabelecendo valores de ganho, potência de saída e estabilidade dos circuitos amplificadores; Fabricar dispositivos sensores a ressoadores SAW; Verificar o comportamento característico do ressoador SAW após a deposição do filme sensível; Montar o sistema de caracterização do sensor SAW.

II. CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS ACÚSTICAS

E. R. Braga, edmilson@lme.usp.br, A. Y. Nakano, aynakano@lme.usp.br, M. P. Cunha, mcunha@lme.usp.br, Escola Politécnica da USP, Tel. (11) 818.5578/5255, Fax (11) 818.5585.

Trabalho recebido em 30 de março de 2002.

As ondas mecânicas que se propagam em um cristal piezolétrico têm origem nas perturbações produzidas no material, e nas forças restauradoras internas ao material que tendem a retornar a estrutura do cristal à posição de equilíbrio. Se as deformações são periódicas, as interações entre deformações e retorno à posição de equilíbrio produzem as ondas mecânicas que se propagam no cristal. Essas ondas mecânicas são igualmente chamadas de ondas elásticas, denominação que se reporta ao fato de as forças restauradoras internas ao material serem proporcionais às deformações que lhe são impostas, o que se observa nos dispositivos de ondas acústicas usualmente implementadas.

As ondas acústicas superficiais são ondas guiadas que pressupõem a existência de uma superfície, sendo compostas de uma combinação linear de componentes transversais, longitudinais e elétricos (no caso de materiais piezolétricos), usualmente denominados modos parciais [26, 30], que decaem com a profundidade.

III. DISPOSITIVOS SAW

Os dispositivos SAW empregam, em geral, um cristal piezolétrico e estruturas transdutoras interdigitais metálicas (*IDT-Interdigital Transducer*), fabricadas com o emprego de técnicas de filme fino e filmes metálicos de alumínio. [25-28].

A faixa de alcance em frequência para dispositivos comerciais de SAW varia de aproximadamente 30 MHz a alguns GHz, correspondendo ao estado da arte da largura da linha interdigital (0.1 μ m).

Duas estruturas de construção dos dispositivos SAW, para o elemento sensor são: o ressoador e a linha de atraso SAW (Figura 1 – (a) e (b) respectivamente). Em ambas ocorre alteração da velocidade de fase das ondas acústicas superficiais (v_f) no substrato piezolétrico, utilizada para o efeito sensor, dada a presença do gás que se deseja detectar.

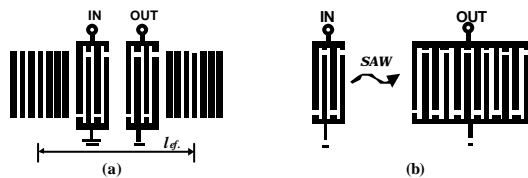


Figura 1 – Dispositivos SAW: (a) Ressoador; (b) Linha de atraso.

Dependendo do tipo de detecção, física ou química, ou ambos, como aplicação dos sensores SAW, dois tipos de interação entre o ambiente e o dispositivo podem ser observados. No primeiro, há uma interação física de toda a superfície do substrato SAW com o ambiente, que o deforma e, assim, muda as condições de propagação das ondas acústicas superficiais, como nos sensores SAW de temperatura e de pressão [27, 33].

No segundo tipo, para a detecção química, é colocado sobre parte ou toda a área superficial do dispositivo, um filme sensível ao gás a que se deseja detectar no ambiente. Este filme possui a função de selecionar, na adsorção ou absorção, a espécie de amostra a ser detectada, além de aumentar a capacidade sensível do dispositivo sensor SAW. [27, 34-36].

IV. DISPOSITIVO UTILIZADO - RESSOADOR SAW

O ressoador SAW usa uma ou duas estruturas IDT's no centro entre duas grades que refletem totalmente as ondas acústicas superficiais (Fig. 1 – (a)) confinando a energia acústica dentro da cavidade ressonante [27, 31, 37-39]. A frequência de ressonância f_0 é determinada por:

$$f_0 = \frac{nv_r}{2l_{ef}}$$

Onde l_{ef} é o comprimento efetivo do ressoador, n é o número de harmônicas e v_r é a velocidade de propagação das ondas acústicas superficiais (SAW) na estrutura [40].

Para a aplicação em sensores de gases SAW, deposita-se sobre a área de cada tipo de estrutura ressoadora SAW, um filme sensível ao gás que se quer analisar (figura 2). Nos ressoadores, toda a área do substrato é utilizada [34]. A espessura do filme e o carregamento de massa depositado no dispositivo SAW estão relacionados com a perda de inserção, com o desvio de frequência de ressonância e com a condutividade elétrica do filme sobre o dispositivo. Com o carregamento do gás sobre a espessura do filme, as constantes elásticas e dielétricas do filme aumentarão a perda de inserção e reduzirão a frequência de ressonância do dispositivo [13-15, 27].

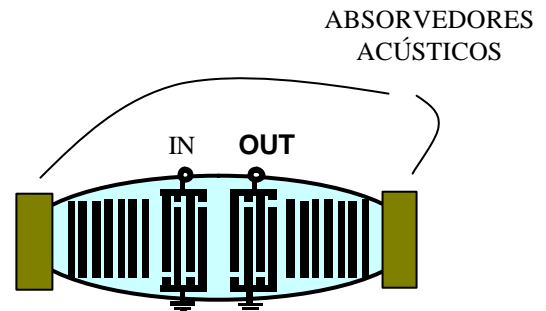


Figura 2 – Dispositivos Sensores Ressoador SAW cobertos por um filme sensível.

V. DEPOSIÇÃO DO FILME NO DISPOSITIVO RESSOADOR SAW

Antes de iniciar a deposição do filme no dispositivo SAW, verificou primeiramente as condições de atenuação e frequência, mediu-se o dispositivo encapsulado, no *Network Analyzer HP 8510*. Realizou-se, em seguida, o processo de retirada do encapsulamento de metal. O dispositivo SAW é trabalhado em um torno mecânico, onde foi retirada somente a parte superior do encapsulamento. Em seguida, o dispositivo foi colocado em um Becker contendo acetona aquecida a temperatura de 45°C durante 20 minutos para a possível eliminação de impurezas geradas no processo de corte do encapsulamento pelo torno mecânico. Logo em seguida, o dispositivo foi colocado em outro Becker, que

contém álcool isopropílico, em temperatura ambiente, durante 2 minutos, para eliminação dos resíduos da acetona. Finalmente, o dispositivo foi colocado numa estufa onde é realizado o processo de secagem estando, então, pronto para a deposição do filme sensível.

Para a aplicação do filme sensível foi utilizado um equipamento nebulizador hospitalar de inalação para os brônquios, adaptado para a deposição da solução do filme acetato de celulose/acetona. Este equipamento possui um controle de velocidade de fluxo, que proporciona um melhor controle na deposição. Valores de partículas de água, abaixo de 5µm de diâmetro, são conseguidos pelo equipamento utilizado, segundo seu fabricante, o que melhora a qualidade da deposição da solução.

Foi realizada a deposição da solução preparada de 300 miligramas de acetato de celulose e 80 mililitros de acetona, no dispositivo ressoador SAW durante 50 segundos, colocado no equipamento de centrifugação Spinner, na velocidade de 500 rotações por minuto, para espalhamento do filme depositado, com o objetivo de conseguir uma espessura homogênea.

Após a realização do processo de deposição do filme, o dispositivo foi novamente colocado na caixa de teste e é verificada a atenuação extra, provocada pelo processo anterior, através dos parâmetros S21, no Analisador de Redes HP 8510. Se o dispositivo não apresentar problemas de natureza física e elétrica, na sua fabricação, o mesmo poderá, então, ser utilizado como dispositivo sensor e ser inserido no elo de realimentação do circuito oscilador sensor SAW.

VI. SISTEMA SENSOR A RESSOADOR SAW

Construiu-se um sistema sensor utilizando dois osciladores idênticos em 303 MHz empregando ressoadores SAW

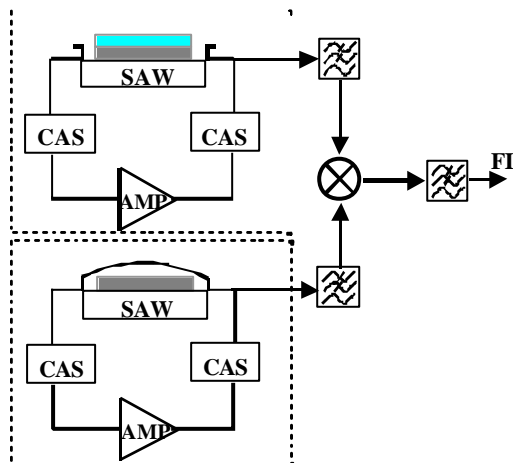


Fig. 03 - Diagrama de Blocos do Dual osciladores SAW empregado como Sensores de Gases. AMP. – Amplificador; CAS – Rede de casamento de impedância; SAW – Ressorador a OAS..

disponíveis comercialmente produzidos pela RF Monolithics. Um dos ressoadores é mantido fechado hermeticamente (encapsulado), e usado como uma referência

num oscilador. O outro ressoador teve seu encapsulamento de metal removido, e depois de um tratamento de limpeza da superfície do dispositivo, depositou-se um filme de acetato celulose, de espessura aproximadamente 7000 Å, através de borrfamento e centrifugação. Este segundo ressoador é o dispositivo sensor atual, introduzido no elo de realimentação do segundo oscilador, Fig. 03.

Cada ressoador SAW é introduzido em seu próprio oscilador, projeto esse discutido em publicações prévias. Para a aplicação em sensores, o projeto do oscilador tem que compensar a atenuação extra, resultado da aplicação do filme sensível no ressoador SAW. O ganho do loop do oscilador deve ser ajustado para satisfazer o critério de oscilação (ganho no loop maior que uma unidade). O sistema de sensor SAW é baseado na mistura dos dois sinais de RF: a referência e o sensor [37-39]. A diferença de frequência, subtraído o efeito de carregamento de massa pelo filme, é utilizada na medida da presença do material, no presente caso, concentração de acetona e álcoois.

Fig. 4 apresenta o sistema de sensor a OAS, juntamente com o sistema de aquisição de dados. Considerando que são esperados harmônicas e outros sinais espúrios como resultado da operação de misturador não-linear, um filtro passa-baixa foi inserido para eliminar as frequências acima de 1600 KHz, como também mostrado na Fig. 4. Os resultados do sistema sensor como um detector de concentração de acetona e álcoois são apresentados a seguir.

VII.RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SISTEMA SENSOR

O sistema de medidas do sensor, utilizando dual osciladores à ressoadores SAW, foi empregado anteriormente pelos autores como detector de umidade em várias temperaturas [39]. Nesta seção, foram realizados ensaios experimentais com dois grupos de amostras. O primeiro grupo, consiste de amostras de álcool etílico, álcool isopropílico e acetona.

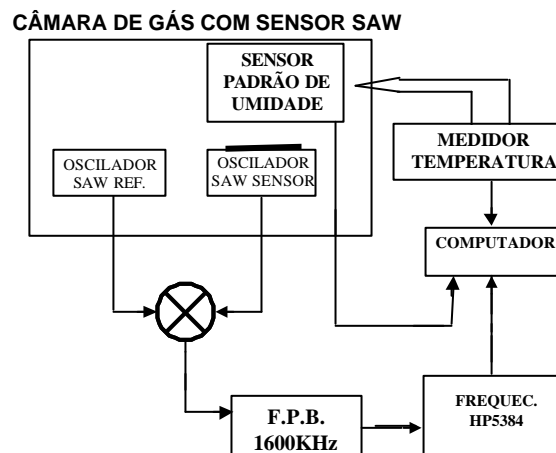


Fig. 04 - Câmara do Sistema Sensor de Gases, utilizando um esquema de dual osciladores SAW.

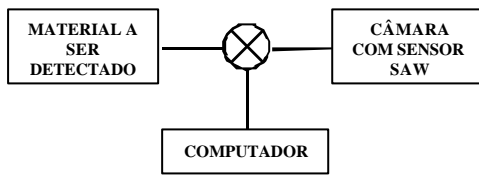


Fig. 05 - Processo de Injeção da Amostra Líquida na Câmara de Ensaio

No segundo grupo, foram utilizadas amostras de gases de aguardentes comerciais brasileiras, que são substâncias derivadas do álcool etílico.

Para a caracterização do sistema sensor SAW foram utilizadas duas metodologias. Na primeira (Fig. 05), utilizou-se o processo de injeção, através de uma seringa graduada, de quantidades líquidas das amostras na câmara de ensaio de 03 litros, na temperatura ambiente de 25°C e 5% de umidade relativa.

Através de um sistema de ventilação forçada dentro da câmara fechada, pode homogenizar os vapores da amostra sobre o conjunto sensor. Os vapores das amostras, portanto, sensibilizam o sensor SAW ao longo do tempo. A fig. 06 mostra a resposta do sensor SAW, utilizando três tipos de amostras: o álcool isopropílico, o álcool etílico e acetona, neste primeiro método.

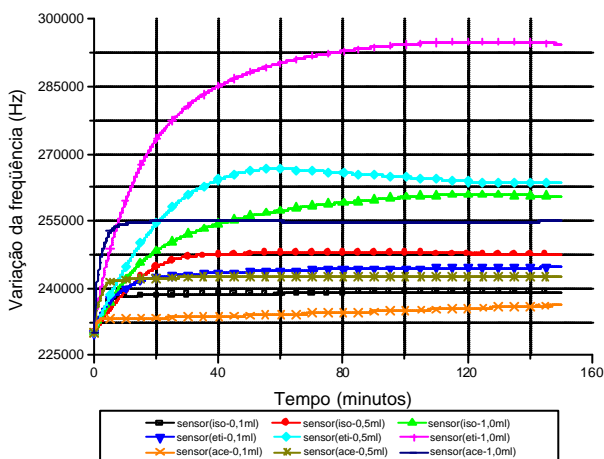


Fig 06 - Resposta do sensor após os vários tipos de amostras: ISO – Isopropílico; ETI – Etílico; ACE – Acetona.

Pode-se verificar as diversas sensibilidades do sensor SAW, cobertos com o filme de acetato de celulose, para as diferentes quantidades e tipos de amostras inseridas na câmara de ensaio. Note-se, por exemplo, que a maior variação na frequência do sistema, de 65 KHz, ocorre na injeção de 1.0 ml de álcool etílico aproximadamente, num período de 80 minutos, quando se dá a estabilização do carregamento de massa. Nota-se, em todas as curvas dos ensaios, uma maior sensibilidade do sensor SAW, nos primeiros 20 minutos de exposição da substância. Durante

esse período, há uma acentuada adsorção de massa na superfície do filme que provoca uma maior mudança na velocidade característica das OAS do dispositivo SAW. Como resultado observa-se uma maior diferença na frequência entre o conjunto dos osciladores sensor e referência.

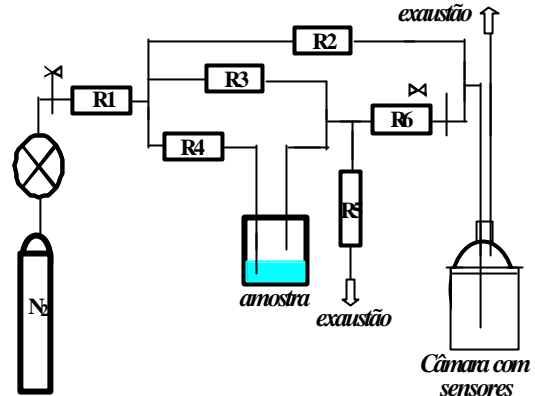


Fig. 07 - Sistema com Fluxo Contínuo de Gases na Câmara

Na fig. 07, é apresentado o segundo método de caracterização do sensor. Um sistema de controle dos fluxos do gás injetado permite controlar as concentrações dos gases das amostras [40].

Neste método, o nitrogênio foi utilizado como gás de arraste do sistema, minimizando sobre a resposta do sensor na câmara, os efeitos da umidade relativa do ar e da temperatura, mantendo-os constantes.

A fig. 08 apresenta as curvas de resposta do sensor para o segundo sistema. Foram inseridas primeiramente na câmara do sensor SAW, as mesmas amostras ensaiadas no primeiro sistema, ou seja, o álcool isopropílico, o álcool etílico e a acetona. Fixado, nos rotâmetros, o fluxo da composição de nitrogênio mais os vapores de cada amostra ensaiada, constantes a umidade e temperatura, pode-se verificar a sensibilidade do sensor para estas substâncias.

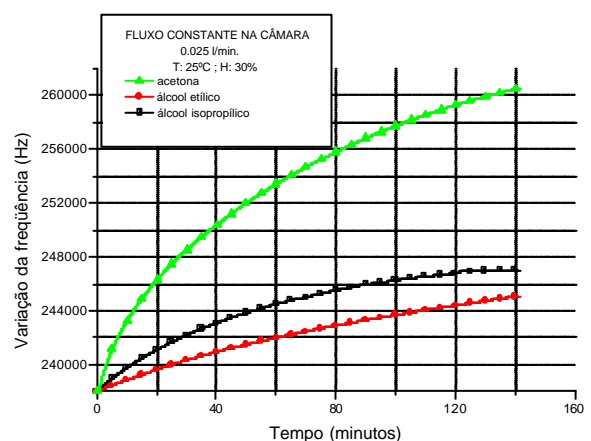


Fig. 08 - Resposta do sensor após os vários tipos de amostras

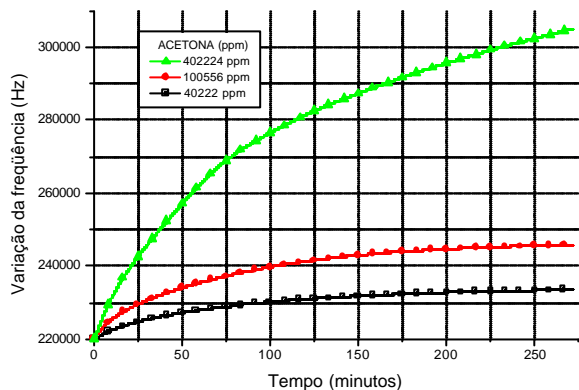


Fig. 09 - Resposta do sensor a variação da concentração de acetona

Observa-se neste método, que o sensor em análise possui uma maior sensibilidade aos vapores de acetona em relação às demais amostras. No primeiro intervalo de 40 minutos, observa-se uma variação na frequência do sensor de 12 KHz para a acetona, ao passo que, no mesmo período, a variação para o álcool isopropílico e para o álcool etílico foram de 5KHz e 3KHz, respectivamente.

A vantagem deste sistema de ensaio em relação ao modelo anterior é a de permitir inserir na câmara concentrações menores de amostras, devido ao fato de que apenas vapores da amostra diluída com o gás de arraste, no caso o nitrogênio, entram na câmara, enquanto, no esquema anterior, é injetada uma quantidade líquida da amostra dentro do volume da câmara.

A Fig. 09 apresenta a resposta do sensor SAW ao ensaio da variação na concentração de acetona através da variação do fluxo nos rotâmetros [40] Nota-se que para uma concentração 10 vezes maior, aumenta-se o tempo de estabilização em aproximadamente 3 vezes.

A fig. 10 apresenta os resultados obtidos do sensor SAW para as diversas amostras das aguardentes comerciais brasileiras analisadas.

É importante observar que depois de encerrado cada ensaio, a câmara passa por uma purga de nitrogênio, durante 30 minutos, para retirada da amostra.

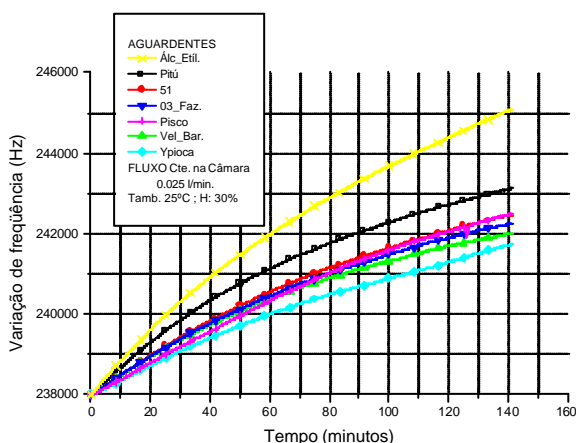


Fig. 10 - Resposta do sensor a diversas amostras de aguardentes comerciais brasileiras

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a caracterização de um sistema sensor a ressoador SAW, que foi testado para medir as concentrações de gases de acetona e álcoois, como uma avaliação de sua capacidade.

São usados dois dispositivos ressoadores SAW comerciais de 303 MHz, um hermeticamente selado e utilizado no primeiro oscilador como referência, e o outro, com um filme de acetato celulose depositado em sua superfície, agindo assim como o dispositivo sensor. Cada ressoador foi introduzido em seu oscilador específico, projetado para suprir perdas extras devido à presença do filme no oscilador com o dispositivo sensor. Um esquema do dual oscilador foi empregado para o sistema de sensor.

A resposta do sistema de sensor de SAW medindo as concentrações de gases foi apresentada para temperatura e umidade relativa constante.

No sistema de caracterização estático, onde se injetam quantidades determinadas de solvente, de no máximo 1,0 ml, no volume da câmara de 03 litros, o sensor SAW apresenta tempos de resposta menores, inferiores a 40 minutos para a estabilização, em relação ao sistema dinâmico, com fluxo constante de gás, com um tempo de estabilização superior a 140 minutos.

Dados os resultados obtidos com o sistema implementado para medidas de acetona e álcoois, prevê-se o contínuo desenvolvimento e caracterização desse sistema para outros gases no futuro.

REFERÊNCIAS

- [1] YAMAZOC MIURA N.: "Environmental gas sensing" - **Sensors and Actuators B**, v. b20. n.2-3 pp. 95-102, 1994.
- [2] MEIXNER H. GERBLINGER J. FLEISCHER M.: "Sensor for Monitoring Environmental Pollution" - **Sensors and Actuators B**, v. b15. n. 1-3. pp. 45-54, 1993.
- [3] KOROLKOFF N. O.: "Survey of Toxic Gas Sensors and Monitoring Systems" - **Solid State Technology**, Pp. 49-64, 1989.
- [4] MOUSA-BAHIA A. A. , COLES G. S. V., GIBSON M. J., WILLETT M. J.: "The characterization of semiconductor gas sensors II. A critical comparison with respect to products of combustion" - **Sensors and Actuators B**, v. b19. n. 1-3. pp. 668-74, 1994.
- [5] BOTT B. , JONES T. A.: "The Use of Multisensor Systems in Monitoring Hazardous Atmospheres" - **Sensors and Actuators**, V. 9 pp 19-25, 1986.
- [6] ZAROMB S., STETTER J. R.: "Theoretical Basic for Identification and Measurement of Air Contaminants using an Array of Sensors having Partly Overlapping Selectivities" - **Sensors and Actuators** , V.6 pp. 225-243, 1984.
- [7] NAGLE H. T; OSUNA G. R.; SCHIFFMAN S. S.: "The How and Why of Electronic Nose" - **Spectrum**, v.35, n.9, p.22- 34, 1998.
- [8] CASTILHO D.: - "Analisadores de Gases" - **Dissertação de Mestrado, apresentada a EPUSP**, 1996.
- [9] VAN DER SCHOOT B. H. , JEANNERET S. VAN DER BERG A., ROOIJ N. F.: "A silicon Integrated Miniature Chemical Analysis System." - **Sensors and Actuators**, V. B. n. 6 pp. 57-60, 1992.
- [10] MATHEWS H.: "Surface Wave Filters, Design, Constructions, and Use". - **A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA**, 1977.
- [11] ARN D.; BLOM N.; DUBLER - STEUDLE K.;GRABER N.; WIDMER H. M.: "Surface Acoustic Wave Gas Application in the Chemical Industry". - **Sensors and actuators A**, p. 239 - 97, 1991.
- [12] BANDA P. A.; WLDARSKI W. B.; SCOTT J. R.: "Modeling Aspects of Surface Wave Gas Sensors". **Sensors and Actuators A**, v. 41 - 42, p. 638 - 42, 1994.

- [13] BRAGA E. R., NAKANO A. Y., CUNHA M. P.: "A SAW Resonator Sensor System employed in Humidity Measurements". **International Microwave and Optoelectronics Conference**, Brazil, 1999.
- [14] BUFF W. : "Saw Sensor System Application" - **IEEE Microwave System Conference**, v. 7B-3, p. 215 - 8, 1995.
- [15] CALIENDO C.; VERARDI P.; VERONA E.; D' AMICO A.; NATALE C.; SAGGIO G.; SERAFINI M.; PAOLESSE R.; HUQ S. E.: "Advances in SAW - based Gas Sensors." - **Smart Mater. Struct.**, v. 6, p. 689 - 99, 1997.
- [16] CALIENDO C.; VERONA E.: "Surface Acoustic Wave Sensors." - **IEEE Microwave System Conference**, p.521-4, 1994.
- [17] CALIENDO C.; VERONA E.; ANISIMKIM V. I.: "Surface Acoustic Wave Humidity Sensors: A Comparison Between Different Types of Sensitive Membrane." - **Smart Materials Struct.**, v.6, p. 707 -15, 1997.
- [18] CALIENDO C.; VERONA E.; D' AMICO A.; FURLANI A.; IUCCI G.; RUSSO M. V.: "Surface Acoustic Wave Humidity Sensor." - **Sensors and Actuators B**, v. 15-16, p. 288-92, 1993.
- [19] CARON J. J.; ANDLE J. C.; VETELINO J. F.: "Surface Acoustic Wave Substrates for Gas Sensing Applications." - **IEEE Ultrasonics Symposium**, p 461-66, 1995.
- [20] CARON J. J.; HASKELL R. B.; LIBBY D. G.; FREEMAN C. J.; VETELINO J. F.: "A Surface Acoustic Wave Mercury Vapor Sensor." - **IEEE International Frequency Control Symposium**, p. 133-9, 1997.
- [21] CARON J. J.; KENNY T. D.; LEGORE L. J.; LIBBY D. G.; FREEMAN C. J.; VETELINO J. F.: "A Surface Acoustic Wave Nitric Oxide Sensor." - **IEEE International Frequency Control Symposium**, p. 156-62, 1997.
- [22] CHANG M-S.; MURAMATSU H.; KARUBE I.: "Development of Odorant Sensor using SAW Resonator Oscillator incorporating Odorant-Sensitive LB Films and Neural - Network Pattern Recognition Scheme." - **Sensor and Materials**, v. 7, n.1, p. 13-22, 1995.
- [23] LORD RAYLEIGH: "On waves propagating along the plane surface of an elastic solid", **Proc. London Math. Soc.**, vol. 7, pp. 4-11, Nov. 1885.
- [24] WHITE R. M. ; VOLTMER F. W.: "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves," **Appl. Phys. Lett.**, vol. 17, pp. 314-316, 1965.
- [25] CUNHA M. P.: "Princípios, Dispositivos e Aplicações de Ondas Acústicas Superficiais (SAW)". **TELEMO 96. - VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**; Curitiba, p.3-43, 1996.
- [26] CUNHA M. P.: "Desenvolvimento de Convolutores Elásticos empregando Tecnologia de Ondas Acústicas Superficiais (SAW)." - **Dissertação apresentada a EPUSP**, 1989.
- [27] FISCHERAUER G.; SIEMENS A.G.; MAUDER; MÜLLER R.: - "Acoustic Wave Devices." **Sensors - A Comprehensive Survey - Micro and Nanosensor Technology Trends in Sensor Markets**, V. 8, 136-73, 1995.
- [28] VELLEKOPP M. J.: "Acoustic Wave Sensors and Their Technology." - **Ultrasonics**, v. 36, p. 7- 14, 1998.
- [29] AULD, B. A.: "Acoustic Fields and Waves in Solids", vols. I & II, **Robert E. Krieger Publishing Company**, vols. I & II, Malabar, Florida, 1990, 2nd. Edition.
- [30] FARNELL, G. W.: "Properties of Elastic Surface Waves" - **Physical Acoustic**, Vol. 06, W. P. Mason and R. N. Thurston, Ed. New York, Academic Press, 1970, pp. 109-166.
- [31] MORGAN, D.P.: "Surface Wave Devices for Signal Processing." - Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [32] OLINER A. A., ed. (with contributions by Ash E. A., Farnell G. W., Gerard, H. M., Oliner A. A., Slobodnik A. J. Jr., Smith H. I.), - "Acoustic Surface Waves." - **Topics in Applied Physics**, Vol. 24, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1978.
- [33] VIENS MARTIN; CHEEKE D. N.: "Highly Sensitive Temperature Sensor Using SAW Resonator Oscillator." - **Sensors and Actuators A**, 24 (1990) pp. 209-211.
- [34] BENES E.; MARTIN GRÖSCHL; SEIFERT F.; POHL A.: "Comparison between BAW and SAW sensor principles." - **IEEE Transactions, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 45, n.5, p. 1314 - 30, 1998.
- [35] MARTIN S. J.; FRYE G. C.; SPATES J. J.; BUTLER M. A.: "Gas Sensing with Acoustic Devices." - **IEEE Ultrasonics Symposium**, p.423-34, 1996.
- [36] YAKOVEIN L. B.; VLASSOV Y. N.; KOZLOV A. S.; REPINSKY S.: "Highly Sensitive SAW Sensors." - **IEEE International Frequency Control Symposium**, p. 395-400, 1994.
- [37] M. Pereira da Cunha and F. S. Correia, "A Low-cost High Performance SAW Resonator Oscillator," SBMO-91 International Microwave Conference Proceedings / Brazil, pp. 510-515, Rio de Janeiro, RJ, 22 to 25 July 1991.
- [38] Z. Liron, J. Greenblatt, G. Frishmann, N. Gratziani, A. Biran, *Sensors and Actuators B*, pp.115-122, 1993.
- [39] E. R. Braga, A. Y. Nakano, M. P. da Cunha, "A SAW Resonator Sensor System Employed in Humidity Measurements", IMOC, 1999, Rio de Janeiro, RJ/Brazil.
- [40] D. Castilho "Analisador de Gases" Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP -96, pp. 51-68.