

MICRO – FABRICAÇÃO DE SENSORES S.A.W. BASEADOS EM FILMES FINOS A PARTIR DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.

Pedro Henrique Campos Ramalho (IC) e Bruno Luis Soares De Lima (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Atualmente, a poluição está se tornando um problema significativo nas áreas urbanas. Portanto, é necessário monitorar esses gases para garantir a qualidade do ar. Com isso em mente, surgiu a necessidade de desenvolver uma maneira rápida e precisa de medir os gases, que também seja relativamente de baixo custo. Sensores de ondas acústicas de superfície (S.A.W.) são sistemas micro eletromecânicos (MEMS) que dependem da modulação das ondas acústicas de superfície para detectar fenômenos físicos. Essa tecnologia foi introduzida por Wöhljtjen e Dessy em 1979 para aplicações de detecção química.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sensor com base nos parâmetros estabelecidos por meio dos resultados da simulação no software COMSOL Multiphysics® e uma eletrônica para ler os dados coletados pelos sensores.

Palavras-chave: S.A.W., Sputtering, eletrônica

ABSTRACT

Currently, pollution is becoming a significant problem in urban areas. Therefore, it's necessary to monitor these gases to ensure air quality. With that in mind, there arose a need to develop a quick and accurate way to measure these gases, which is also relatively low-cost. Surface Acoustic Wave (S.A.W.) sensors are micro-electromechanical systems (MEMS) that rely on the modulation of surface acoustic waves to detect physical phenomena. This technology was introduced by Wöhljtjen and Dessy in 1979 for chemical detection applications.

This paper proposes the development of a sensor based on the parameters established through simulation results in the COMSOL Multiphysics® software and electronics to read the data collected by the sensors.

Keywords: S.A.W. , Sputtering, electronics

1. INTRODUÇÃO

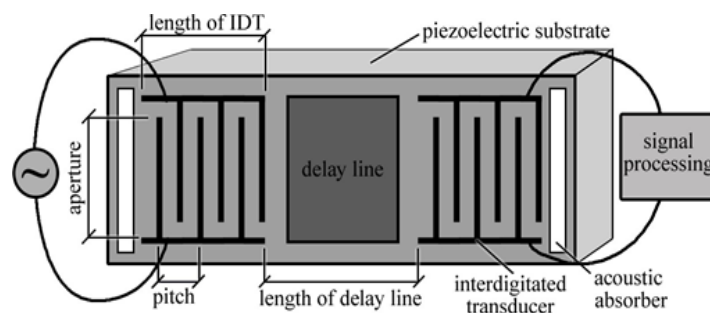
A tecnologia SAW (*Surface acoustic wave*) para aplicações de detecção química foi introduzida por Wöhljtjen e Dessy em 1979 (WÖHLTJEN E DESSY, 1979).

Desde então têm tido muitas pesquisas com ondas de superfície, como, aplicação em sensores implantáveis para monitoramento de pressão arterial (LIANG *et al.*, 2011), sensores de temperatura para linhas de transmissão de energia elétrica (TAN *et al.*, 2016), sensores de torque para aplicações marítimas (KALININ *et al.*, 2017) e tem obtido relativa atenção na comunidade científica (CHENG, *et al.*, 2022).

As principais vantagens deste sensor são sua alta sensibilidade, como observa-se no trabalho de Sensores de ondas acústicas de superfície (SHIOKAWA *et al.*, 2004), ótimo tempo de resposta, como citado no trabalho de (HONGLANG *et al.*, 2011), tamanho reduzido, como relatado no trabalho de (KIRSCHNER *et al.*, 2022) relativo baixo custo e a capacidade de integração com eletrônica e comunicação de dados (DRAFTS, *et al.*, 2001, KIRSCHNER, *et al.*, 2010).

Os sensores SAW são uma classe de sistemas micro - eletromecânicos, sigla MEMS (*Microelectromechanical systems*) que depende da modulação de ondas acústicas de superfície para detectar um fenômeno físico. Essa tecnologia consiste em excitar uma antena transmissora com um sinal elétrico de entrada em uma onda mecânica, que ao contrário dos sinais elétricos, podem ser facilmente influenciados por fenômenos físicos. A antena receptora converte de volta em um sinal elétrico, onde as mudanças na amplitude, fase, frequência ou tempo de atraso entre os sinais elétricos nas antenas de entrada e saída podem ser usadas para aferir a presença do fenômeno desejado. (KIRSCHNER, 2010), conforme visto na Figura 1:

Figura 1: Apresenta o sensor SAW.

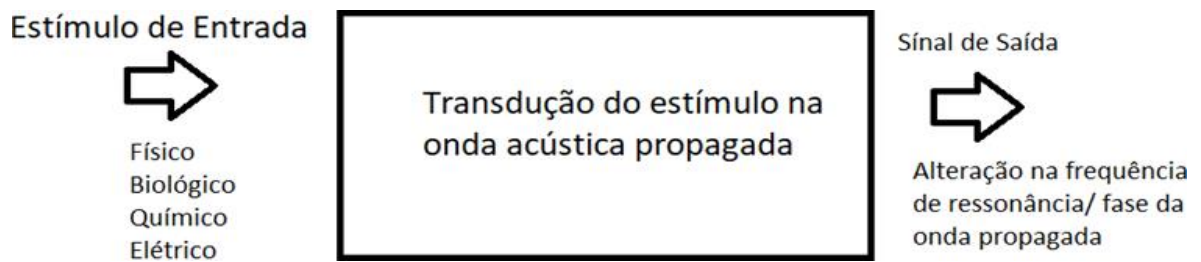


Fonte: (KIRSCHNER, 2010)

A estrutura do sensor permite que diversos fenômenos de pressão, deformação, torque, temperatura e massa sejam detectados. Sua funcionalidade inerente pode ser

estendida pela deposição de filmes finos. Se um determinado fenômeno físico (vapores químicos (DEVKOTA et. al., 2017), material biológico (TIGLI et. al., 2005), umidade (ZHANGGLIANG et. al., 2021), radiação ultravioleta (KUMAR et. al., 2009), campos magnéticos (CHIN et. al., 2006) e viscosidade (YILDIRIM et. al., 2018), causar alterações no comprimento ou de massa do filme fino depositado, a onda acústica será alterada em funções destes e de outros vários parâmetros que inferem a velocidade de propagação de onda eletromagnética no meio material, conforme visto na figura 2:

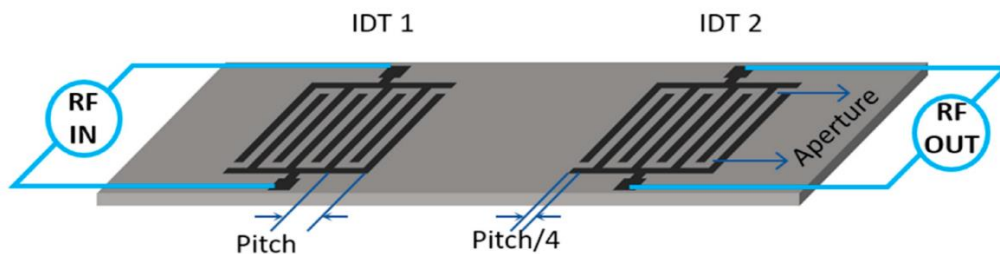
Figura 2: Algoritmo explicativo do sensor SAW.



Fonte: Autor

A Figura 2 apresenta uma simples esquematização algorítmica do funcionamento do sensor SAW. A tecnologia SAW permite obter sensores miniaturizados com processos de fabricação compatíveis com a eletrônica para tratamento de sinais, o que pode possibilitar dispositivos com integração e robustos (KERTSING, et al., 2006).

Figura 3: Apresentação da estrutura de um sensor SAW.



Fonte: Devkota, et. al., 2018.

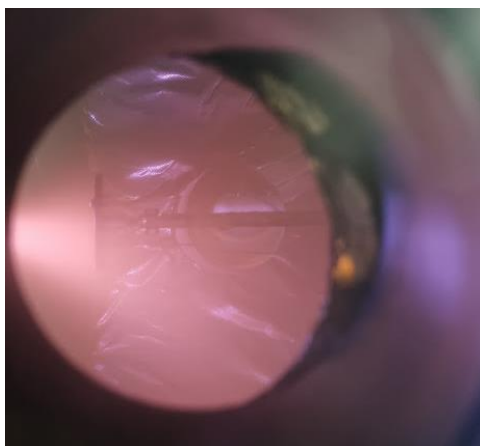
Como observado na Figura 3, o IDT (transdutor interdigital) 1 é excitado por um sinal de RF (rádio frequência) produzindo a onda acústica que se propagará pela superfície do substrato piezoelétrico. O IDT2 poderá receber ou refletir a onda acústica, a onda

acústica perturbada pelo meio físico que é submetido o dispositivo IDT. Quando aplicados a detecção química, alguns sensores SAW, após fabricados, são revestidos com uma camada de materiais poliméricos (BOSTAN, *et al.*, 2010), metálicos (WU, *et al.*, 2003) ou óxidos metálicos, no intuito de facilitar a perturbação mecânica do dispositivo a condições do ambiente devido a adesão deste revestimento a gases do ambiente.

1.1 FILMES FINOS:

Filmes finos são camadas extremamente finas de material, geralmente com uma espessura na ordem de micrômetros. Essas camadas podem ser depositadas em diferentes tipos de substratos. Existem várias técnicas para a deposição desses filmes, como a deposição química em fase vapor (CVD) e a deposição física em fase vapor (PVD), como observado na Figura 4. Eles têm uma ampla gama de aplicações na indústria, incluindo eletrônica, semicondutores, displays, células fotovoltaicas, sensores, baterias e muitos outros usos.

Figura 4: Plasma sendo formado dentro câmara do reator.



Fonte: Autor

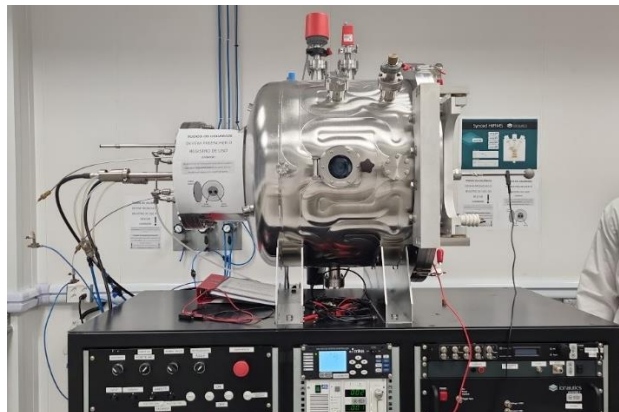
1.2 MAGNETRON SPUTTERING E TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO:

O *magnetron sputtering* é uma técnica de deposição física de vapor (PVD, Physical Vapor Deposition) amplamente utilizada para depositar filmes finos sobre substratos. Essa técnica é frequentemente utilizada na fabricação de semicondutores e na produção de revestimentos protetores para diversas aplicações na indústria.

Seu funcionamento consiste em um ambiente de vácuo (o substrato e o material alvo são colocados em uma câmara de vácuo), onde é introduzido um gás inerte (Argônio), uma tensão é aplicada entre o alvo e o substrato. O gás inerte é então ionizado, criando o plasma. Então um campo magnético é aplicado para confinar o plasma próximo ao material alvo, onde ocorre o desprendimento de elétrons do alvo, fazendo com que os átomos ou moléculas “cuspidos” do alvo viajam através da câmara de vácuo e se depositam no substrato, formando o filme fino.

A técnica de *magnetron sputtering* (ilustrado na figura 5) permite a deposição de uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, semicondutores e dielétricos. Também permite um controle preciso da espessura e da composição do filme depositado. Por essas razões, é uma técnica de deposição amplamente utilizada em várias indústrias.

Figura 5: *Magnetron sputtering*:



Fonte: Autor

1.3 PROBLEMAS DA PESQUISA:

Atualmente, a poluição tem se tornado um grande problema nas áreas urbanas, portanto, o monitoramento desses gases se faz necessário a fim de manter a qualidade do ar. Pensando nisso, surgiu a necessidade de se desenvolver uma medição rápida e precisa dos gases e que fosse de relativo baixo custo. A tecnologia SAW (em inglês, *Surface Acoustic Wave*) possibilita que esses sensores sejam aplicados a detecção de gases poluentes com alta confiabilidade e que forneçam informações em tempo real.

Além da detecção de gases poluentes, o sensor desempenha um papel multidisciplinar dentro da indústria, medicina, sistemas de ventilação e usinas de energia (ABRAHAM, *et al.*, 2018).

Pensando em modos de otimizar e reduzir o custo de produção dos sensores S.A.W. o uso de *softwares* de simulação como o *Comsol Multiphysics* tem sido cada vez mais utilizados. Pelo *Comsol Multiphysics*, ao trabalhar com simulações de diversas equações físicas, pleiteia-se simular o funcionamento do sensor em diversas condições, preditivamente analisando possíveis erros, inserindo falhas, analisando materiais eficientes e ineficientes para que se possa fazer ajustes no projeto, visando o sensor ótimo.

1.4 JUSTIFICATIVA:

Com a micro fabricação destes sensores e com a confirmação da viabilidade dos dados teríamos um controle mais otimizado, ágil e confiável do ar dos grandes centros urbanos, indústrias, medicina, sistemas de ventilação e usinas de energia. Sendo assim, seria possível através da tecnologia desenvolver outras aplicações para o sensor, pensando em estudar através do sensor na qualidade do ar nos grandes centros urbanos, o prejuízo que a poluição possa trazer para a saúde dos seres humanos, animais e plantações, controlar os gases emitidos nos centros industriais em cada legislação vigente de cada país.

O desenvolvimento deste projeto possui impactos intelectuais, sociais e econômicos, os quais são brevemente apresentados nos próximos tópicos. A partir desta integração entre dispositivo e eletrônica poderá ser oferecido um produto para monitoramento e controle de gases poluentes. Empresas fabricantes de hardware poderão ser parceiras na prototipagem do hardware integrando sensor e eletrônica de aquisição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SENSORES DO TIPO SAW:

Nas últimas três décadas sensores SAW têm despertado grande interesse nas pesquisas e aplicações industriais voltadas à detecção de gases e poluentes. A detecção de gases e poluentes é baseada na absorção dos reagentes químicos na superfície dos dispositivos SAW (LEVIT, *et al.*, 2002). Isto provoca alterações nas propriedades da camada piezoelétrica, perturbando a onda acústica em sua fase.

Os estudos de sensores SAW para detecção de gases tem se concentrado em pesquisas voltadas a materiais para obtenção da camada para adsorção dos elementos químicos e materiais piezoelétrico (RAJ, *et al.*, 2015), controle de efeitos indesejados

gerados no dispositivo devido ao ambiente e aplicações para monitoramento de diferentes gases.

A camada responsável por absorver os gases deve possuir adesão mecânica com o substrato piezoelétrico e deve suportar o ambiente de medição com grande capacidade de adsorção. Esta camada não pode isolar eletricamente os transdutores (IDTs). Os materiais mais utilizados como camada de adsorção são óxidos de metal semicondutores, polímeros condutores e não condutores, nano tubos de carbono e óxidos de grafeno. As camadas de materiais são obtidas a partir de processos de fabricação de microeletrônica.

Apesar de sua alta sensibilidade a produtos químicos, os sensores SAW podem sofrer interferências de vários fatores internos e externos fazendo com que a saída sofra interferências (CENINI, *et. al.*, 2010). Os fatores internos estão relacionados com propriedades viscoelásticas das camadas de detecção, reflexos de ondas das bordas dos dispositivos, incompatibilidade de impedância dos IDTs e o aumento da temperatura dos materiais do substrato durante a excitação do sinal de RF. Diferentes técnicas são sugeridas e empregadas para minimizar possíveis interferências nesses sensores (COBIANU, *et. al.*, 2010).

Outros desafios relacionados a sensores SAW são os reflexos nas bordas dos dispositivos e o não casamento de impedâncias dos dois IDTs, estes problemas podem ser resolvidos usando absorvedores de onda nas bordas dos dispositivos ou projetando refletores para as ondas. Outro fator que tem sido estudado são os efeitos da temperatura sobre substratos piezoelétricos, materiais de detecção e materiais que compõem o IDT. Variações de temperatura do ambiente podem provocar alterações nas propriedades do material piezoelétrico que compõe o dispositivo, para resolver esta questão é introduzido um dispositivo de referência e no mesmo substrato para subtrair os efeitos da temperatura na resposta do dispositivo. Portanto, existem diversos desafios relacionados ao projeto e fabricação de sensores SAW para detecção de gases que podem ser abordados neste projeto.

Diversos gases como $H_2, H_2S, SO_2, N_2, NO, NO_2, NH_3, CO, CO_2, CH_3, O_2, O_3$, vapores de metanol, etanol, acetona, gases explosivos e gases poluentes são detectados por sensores SAW na literatura (DEVKOTA, *et.al.*, 2017). Sensores químicos também têm sido desenvolvidos para detectar gases numa mistura com detecção simultânea de diferentes gases, neste caso é utilizada uma abordagem de um *array* de sensores SAW. Nesta situação cada SAW é responsável por detectar um respectivo gás, isto é possível pois cada sensor SAW é revestido com uma camada de adsorção compatível com um respectivo gás. PENZA (2013), por exemplo, fabricou um sensor para detecção de NH_3 em uma mistura de gases CO, CH_4 e H_2 .

Dentre vários trabalhos publicados recentemente, destaca-se o de ABRAHAM e seus colaboradores (2019) que realiza simulações pelo método dos elementos finitos (MEF) utilizando o software COMSOL para verificar a possibilidade de materiais nano tubos de carbono, ZnO e CuO como material adsorvente para diferentes gases utilizados na indústria.

Neste contexto, o presente projeto terá por objetivo desenvolver e fabricar, a partir de técnicas de micro fabricação, um sensor SAW para detecção de gases poluentes como amônia, por exemplo. O domínio da tecnologia de fabricação destes dispositivos poderá contribuir para o país nas estratégias de combate, redução e controle de emissão de gases poluentes e detecção de produtos poluentes nas indústrias químicas.

2.2 - FUNCIONAMENTO DE SENSORES SAW:

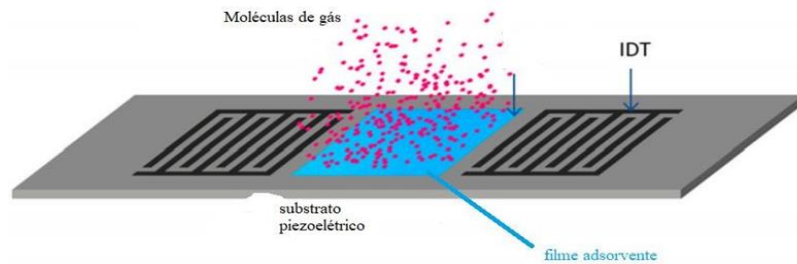
O sensor SAW é composto por um filme metálico depositado sobre um substrato ou filme com propriedade piezoelétrica (WANG, et. al., 2012), (HE, et. al., 2010), (SHIN, et. al., 2008). Este filme metálico compõe um conjunto de eletrodos denominado de IDT que é responsável por emitir e refletir e/ou receber uma onda acústica. Esta onda é propagada na superfície do filme ou substrato piezoelétrico localizado sob o IDT. A onda acústica sofre perturbação do ambiente devido a interação do material piezoelétrico com o ambiente.

A camada piezoelétrica ou sensível é responsável por absorver o gás que se deseja detectar ou medir sua concentração. A adesão do gás ao filme adsorvente altera as propriedades mecânicas do filme piezoelétrico.

A outra parte que compõe a tecnologia SAW são os IDTs. Estes são eletrodos metálicos periódicos depositados sobre o substrato piezoelétrico responsáveis por transmitir e receber o sinal de radiofrequência que se propaga pela superfície do material piezoelétrico.

Quando um sinal alternado é aplicado ao IDT transmissor o material piezoelétrico é pressionado e comprimido mecanicamente de maneira periódica produzindo uma onda acústica. As ondas acústicas viajam pela superfície em ambos os lados dos IDTs. Num material piezoelétrico a propagação desta onda acústica está associada a um campo elétrico que está presente na superfície e interage com uma camada adsorvente ou qualquer meio presente sobre o substrato piezoelétrico. Estas ondas acústicas em contato com o segundo IDT são convertidas num sinal elétrico. A Figura 7 apresenta a estrutura do sensor SAW em contato com moléculas de gás.

Figura 7: Interação entre moléculas de um gás e um sensor do tipo SAW.



Fonte: Devkota, et al., 2018.

A interação com o gás provoca um atraso na propagação da onda acústica em relação à onda original sem a interação com o gás que se deseja detectar. Na abordagem mais tradicional pode ser utilizado um único IDT para excitação e detecção da onda acústica, o segundo IDT funciona como um refletor da onda acústica. Numa segunda configuração, a região entre os dois IDTs funciona como uma cavidade ressonante. Nas duas configurações, a transdução do que se deseja medir ocorre tendo como resultado a mudança de fase, da atenuação ou da velocidade da onda acústica a partir da interação com o gás. A partir da alteração da velocidade da onda é possível coletar e realizar processamento do sinal, medindo as variações de frequência ou variações de fase provocadas pela interação com o gás.

A mudança de velocidade da onda acústica de superfície é o resultado da interação desta com mudanças nas propriedades do meio ou camada de filme sensível como massa, viscosidade, elasticidade, condutividade elétrica, permissividade elétrica, temperatura, pressão ou umidade.

Os sensores SAW podem detectar gases a partir do contato com a camada sensível de três maneiras. A primeira a partir da alteração da massa da camada de filme fino piezoelétrico ou adsorvente pela adesão das moléculas do gás. A segunda pela alteração da propagação da onda pelo efeito acústico-elétrico. O campo elétrico associado a onda que se desloca na superfície é perturbado alterando a condutividade e permissividade elétrica. Um terceiro efeito é alteração das propriedades de viscoelasticidade é influenciada pela adsorção dos gases na superfície.

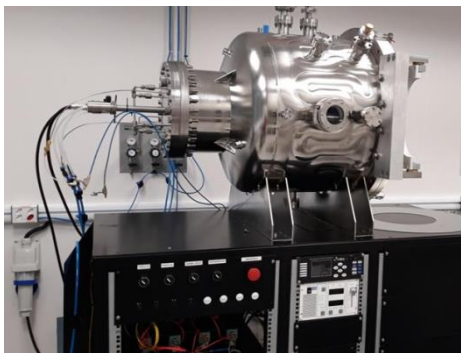
3. METODOLOGIA

Deposição e caracterização por *sputtering* dos filmes que comporão a camada piezoelétrica e os IDTs.

Com as informações obtidas nas simulações, serão iniciados os processos de deposição dos filmes finos pela técnica *magnetron sputtering*. O reator que será usado é apresentado na Figura 8. Confeccionado em aço inoxidável, com 500 mm de diâmetro e 600 de comprimento, o reator possui dois catodos do tipo *magnetron* (Figura 9), que permitem a deposição do filme propagador da onda acústica e sequencialmente do material dos IDTs. As fontes de alimentação existentes são as seguintes: DC (Fonte de corrente contínua), RF (Fonte de rádio frequência) e HiPIMS (fonte de descargas de plasma pulsado), que são escolhidas de acordo com o tipo de material que se deseja produzir. A título de ilustração, a Figura 8 mostra o reator em pleno funcionamento, realizando a deposição de um filme de ZnO.

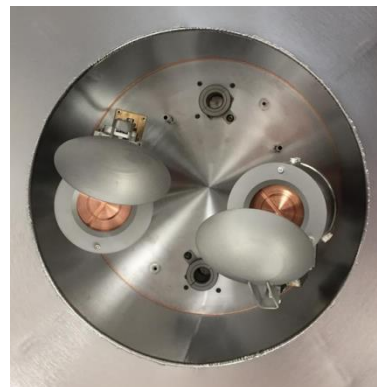
Pretende-se caracterizar os filmes quanto à adesão ao substrato, espessura, propriedades elétricas, e estequiometria utilizando a infraestrutura existente nos laboratórios da EE da UPM ou nas instituições participantes neste projeto.

Figura 8 – Reator de deposição de filmes finos por *magnetron sputtering*.



Fonte: Autor

Figura 9 – Detalhes dos dois catodos do tipo do *magnetron* do reator.



Fonte: Autor

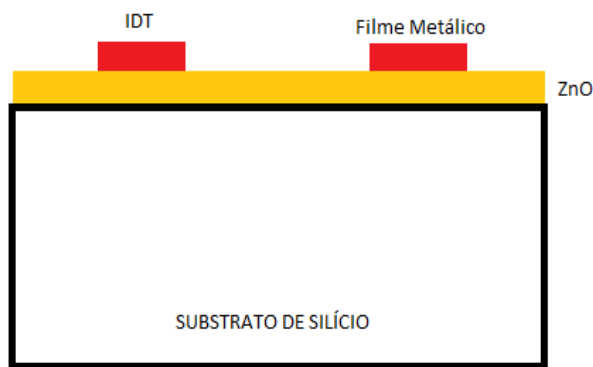
Parte B – Fabricação e caracterização dos sensores SAW.

Com o objetivo de se detectar gases e poluentes serão fabricados os sensores SAW, que serão caracterizados em um dispositivo que será projetado e montado nos laboratórios da Escola de Engenharia Mackenzie. Inicialmente pretende-se avaliar a

sensibilidade do sensor na detecção de NH_3 com sensores SAW confeccionados com filmes de ZnO.

A Figura 10 apresenta um diagrama do *layout* do sensor SAW a ser fabricado com filme de ZnO sobre substrato de silício, seguindo a sequência de fabricação: (1) deposição do filme de ZnO pela técnica de *sputtering*, (2) deposição de filme metálico pela técnica de *sputtering*, (3) litografia para definição do padrão dos IDTs, (4) corrosão do filme metálico para obtenção do padrão dos IDTs metálicos.

Figura 10 - *Layout* do sensor SAW a ser fabricado com filme de ZnO sobre substrato de silício.



Fonte: Autor

Utilizando os recursos existentes nos laboratórios da UPM será montado um *setup* para caracterização dos sensores SAW fabricados. Este *setup* contará com uma fonte de tensão para excitar o sensor e um analisador de espectro para detectar a frequência e diferença de fase das ondas acústicas propagadas através do SAW. Deverá também ser utilizado um ambiente controlado para inserção do gás que se deseja detectar.

Assim, com os resultados obtidos, a equipe terá domínio das técnicas de projeto, fabricação e caracterização de dispositivos SAW, o que permitirá o desenvolvimento de outros sensores químicos para aplicações relevantes para controle de processos industriais e controle de poluição.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Após os resultados obtidos em simulação no *software COMSOL Multiphysics* (resultado de outra iniciação científica) e as pesquisas realizadas com a literatura já existente, foram definidos os materiais a serem depositados com a técnica *PVD (Physical Vapor Deposition)* por *Sputtering*, o ZnO em substrato de silício, IDTs de alumínio e a geometria ideal para o sensor obter a melhor precisão e confiabilidade, demonstradas nas figuras 11 e 12.

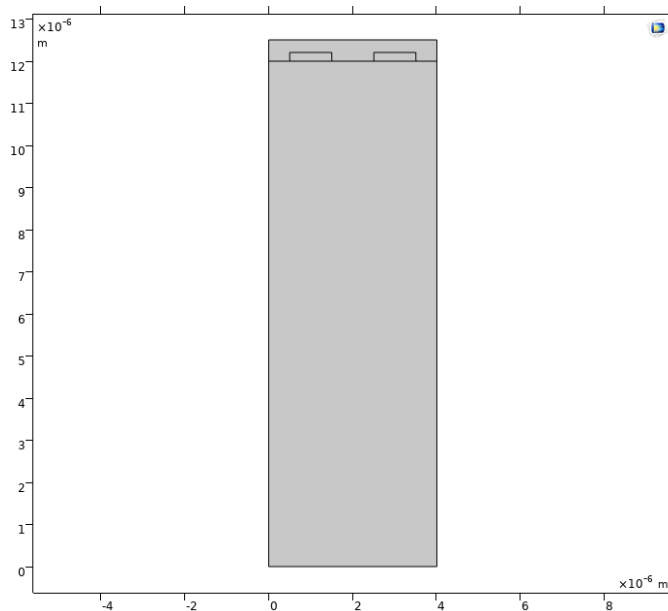
Figura 11: Parametros para deposição do Filme.

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
altura	12000E-9 [m]	1.2E-5 m	altura substrato
largura	4E-6 [m]	4E-6 m	largura substrato
a_FF	500E-9 [m]	5E-7 m	altura Filme Fino
l_FF	largura	4E-6 m	largura Filme Fino
l_IDT	1E-6 [m]	1E-6 m	largura do IDT
a_IDT	200E-9 [m]	2E-7 m	altura do IDT

Fonte: Autor.

Figura 12: Dimensiomamento e geometria simulados no COMSOL.



Fonte: Autor.

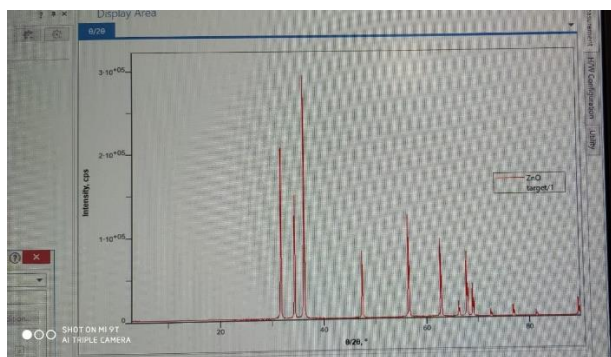
Baseadas nas literaturas já existentes fizemos a simulação do sensor com dimensões 12 μm de altura e 4 μm de largura. Todos os valores mostrados na figura 11 dimensionados para melhor otimização do dispositivo, como demonstrado na geometria da figura 12.

Para atingir os dimensionamentos obtidos na simulação foi necessário utilizar as técnicas de sputtering com uma pressão de vácuo de $7,5 \times 10^{-6}$ Torr, 25 SCCM (centímetro cúbicos padrão por minuto) de gás argônio na câmara, uma potência de 110W na fonte DC, com porta a mostra a temperatura ambiente.

Afim de garantir que a deposição foi feita corretamente foi realizada a análise dos alvos através de três métodos o *DRX* (Difração de Raios X) (Figuras 13 e 14) foi utilizado para ver a concentração de átomos acoplados ao substrato, *RAMAN* (espectroscopia) para orientação cristalográfica do filme fino, *MEV* (Microscópio Eletrônico de Varredura) para avaliar a espessura do filme.

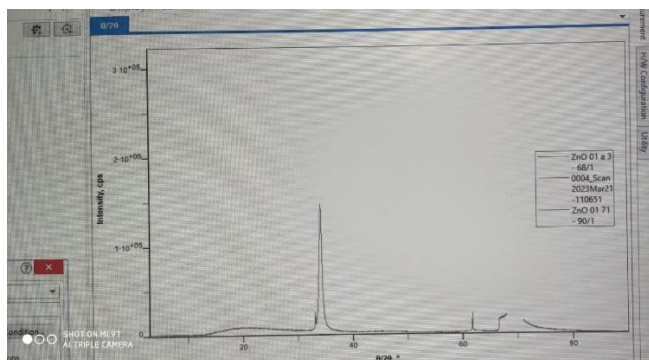
Para acoplar os IDT's ao substrato é realizado a corrosão por plasma após a deposição de uma camada protetora (polímero) para delimitar a corrosão, então é realizado a inserção do IDT e posteriormente é calibrado pelo potencial Zeta (ângulo Zeta).

Figura 13: DRX do alvo de ZnO.



Fonte: Autor

Figura 14: DRX da deposição de ZnO feita sobre silício puro.



Fonte: Autor

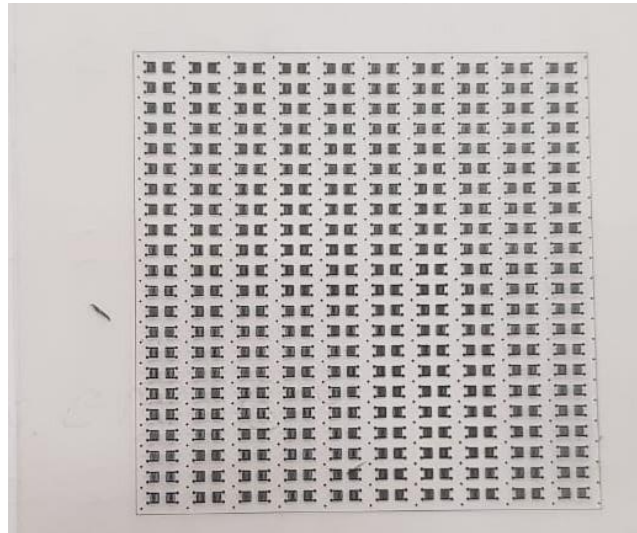
A partir disso, dos resultados obtidos e da identificação da necessidade das industriais por esse sensor foi desenvolvemos o sensor *S.A.W.* com o intuito de otimizar seus processos de fabricação, desenvolver uma eletrônica embarcada e compacta e um *setup* para testes e aprimoramento do mesmo para futura inserção no mercado.

Na figura 15 e 16 está o sensor *S.A.W.* e sua máscara para realizar a confecção dos IDT's.

Figura 15: Sensor *S.A.W.*

Fonte: Autor

Figura 16: Máscara para deposição dos IDT's



Fonte: Autor

Contudo, durante o processo de desenvolvimento do sensor, não foi possível alcançar os resultados previstos e desejados, apesar de termos seguido rigorosamente os padrões estabelecidos para a deposição do material sensível, as dimensões específicas do dispositivo e os parâmetros de teste delineados para a sua avaliação.

Alguns fatores não identificados podem ter influenciado o desempenho do sensor, seja no processo de fabricação, na integridade do material visto que os IDT's sofrem bastante com a oxidação tornando inviável a reutilização do mesmo ou nas condições de teste.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito desta iniciação científica aqui relatada teve como principal objetivo a fabricação de um sensor S.A.W. a partir dos resultados de simulações computacionais avançadas no *software COMSOL Multiphysics*. Estas simulações foram primordiais para determinar a geometria ideal dos Transdutores de Onda Acústica de Superfície (IDT's) para o sensor em questão. Paralelamente, foi realizado um estudo em literatura já existente sobre a escolha dos materiais foi conduzido, buscando identificar substratos e materiais condutores que não

apenas reduzissem o custo de fabricação, mas também melhorassem a precisão e confiabilidade do dispositivo. O intuito final é que tal sensor seja dotado das características necessárias para sua viável introdução no mercado competitivo de sensores.

Uma vez definidos a geometria e os materiais constituintes ideais para o sensor, procedeu-se à etapa experimental. Nessa fase, camadas finas de ZnO foram depositadas sobre um substrato de silício por meio da técnica de *Magnetron Sputtering*, um processo de deposição física em vácuo que utiliza plasma para condensar átomos ou moléculas do material-alvo na superfície do substrato. Tal método foi escolhido pelo seu reconhecido potencial em garantir uniformidade e controle sobre a espessura das camadas depositadas, atributos cruciais para o desempenho ótimo do sensor.

Subsequentemente, após a construção do protótipo do sensor, foi projetado um setup experimental dedicado para testes e coleta de dados. Este sistema não apenas avalia a funcionalidade do sensor, como também serve como plataforma para otimização contínua. Além disso, os dados gerados serão cruciais para o desenvolvimento da eletrônica compacta e de baixo custo. Tais circuitos serão integrados ao sensor, permitindo sua aplicação prática e acessível no mercado, estabelecendo assim a base para futuros avanços no campo.

Tendo em vista essa inconsistência, para estudos e desenvolvimentos futuros, é fundamental que se invista na otimização, no refinamento das técnicas empregadas e emprego de melhores materiais

Agradecimentos:

Este trabalho de pesquisa foi apoiado pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e aos professores: Dr. Marcos Massi, Dr. Bruno Luis Soares De Lima e Dr. Fábio Jesus Moreira de Almeida.

6. REFERÊNCIAS

Academic Editors: Jikui Luo, Weipeng Xuan and Richard Y. Q. Fu, *Sensors* 2017, 17(4), 801; <https://doi.org/10.3390/s17040801>.

B. Liang *et al.*, "A novel implantable saw sensor for blood pressure monitoring," *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2011, pp. 2184-2187, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969371.

Drafts, B.; Acoustic wave technology sensors, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 49(4), pp. 795-802, 2001.

H. Li, X. Wang, Y. Liang e S. He, "Um sensor baseado em serra de resposta rápida para detecção de H₂S", *Simpósio de 2011 sobre Piezoeletricidade, Ondas Acústicas e Aplicações de Dispositivos (SPAWDA)*, 2011, pp. 374- 377, doi: 10.1109/SPAWDA.2011.6167267.

H. Tan, X. Chen, J. Ma and Y. Tan, "A design of substation temperature online monitoring system based on SAW temperature sensor," *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800780.

Kirschner, J., *Surface Acoustic Wave Sensors (SAWS), Design for Application Microelectromechanical systems.*, 2010.

KIRSCHNER, Jared. *Surface acoustic wave sensors (SAWS). Micromechanical systems*, 2010.

K. Stroganov, T. Kronidov, B. Luylin, V. Kalinin and V. Plessky, "SAW temperature sensors for electric power transmission lines," *2014 European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2014, pp. 157-159, doi: 10.1109/EFTF.2014.7331452.

Kumar, S., Kim, GH., Sreenivas, K. *et al.* ZnO based surface acoustic wave ultraviolet photo sensor. *J Electroceram* 22, 198–202 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9409-7>

M. Cheng *et al.*, "Magnetic Field Sensor Based on Magnetic Torque Effect and Surface Acoustic Wave With Enhanced Sensitivity," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2022, Art no. 4000206, doi: 10.1109/TMAG.2021.3125493.

Matthew L. Chin for the degree of Honors Baccalaureate of Science in Electrical Engineering presented on June 5th, 2006. Title: A Fabrication Study of Surface Acoustic Wave Devices for Magnetic Field Detection

O. Tigli and M. E. Zaghoul, "Design and fabrication of a novel SAW bio/chemical sensor in CMOS," *SENSORS, 2005 IEEE*, 2005, pp. 4 pp.-, doi: 10.1109/ICSENS.2005.1597655.

V. Kalinin, A. Leigh, A. Stopps and S. B. Hanssen, "SAW torque sensor for marine applications," *2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*, 2017, pp. 347-352, doi: 10.1109/IFCS.2017.8088889.

WOHLTJEN, Henry; DESSY, Raymond. *Surface acoustic wave probe for chemical analysis. I. Introduction and instrument description. Analytical chemistry*, v. 51, n. 9, p. 1458-1464, 1979.

Xuesong Ye, Lu Fang, Bo Liang, Qiong Wang, Xuejun Wang, Lisong He, Weibin Bei, Wen H. Ko, *Studies of a high-sensitive surface acoustic wave sensor for passive wireless blood pressure measurement, Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 169, Issue 1, 2011, Pages 74-82, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.05.022>.

Z. Xu e Z. Li, "Design and Fabrication of ZnO-Based SAW Sensor Using Low Power Homo-Buffer Layer for Enhanced Humidity Sensing", no *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, não. 6, pp. 7428-7433, 15 de março de 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3049350.]

Contatos:

E-mail aluno: pedro.ramal44@gmail.com (IC)

E-mail orientador: bruno.lima@mackenzie.br (Orientador)