

Sensores e identificadores RF para ambientes hostis

J.C. Mendes*, D. Mukherjee, S. Rotter

Centro de Tecnologia Mecânica e de Automação, Universidade de Aveiro, Portugal

D.M. Santos, M.M. Fernandes

Instituto de Telecomunicações, Pólo de Aveiro, Portugal

F. Figueiras

Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Portugal

* jcmadaleno@ua.pt

Os dispositivos de onda acústica superficial (*Surface Acoustic Wave* - SAW) são componentes electrónicos passivos (isto é, não necessitam de alimentação) que podem ser interrogados remotamente por um feixe de rádio-frequência (RF). No estado actual da tecnologia, são componentes críticos em sistemas de comunicação sem fios, além de poderem também ser usados como sensores de variadas grandezas físicas (como stress, deformação, temperatura, pressão, massa) ou como identificadores. Os dispositivos SAW são compostos por um substrato piezoeléctrico no qual é depositado um transdutor interdigital (IDT) – sob a forma de eléctrodos metálicos interdigitados – responsável pela conversão dos sinais eléctricos, captados por uma antena apropriada, em ondas acústicas, que se propagam através da superfície do substrato e que vão ser modeladas de acordo com o seu estado funcional.

A utilização de SAWs como sensores tira partido da interacção do substrato com grandezas físicas intrinsecamente associadas a várias condições ambientais (temperatura, pressão, humidade, salinidade, etc.), porém a ausência de um encapsulamento apropriado impede a sua utilização generalizada em ambientes relativamente hostis.

Neste contexto, o revestimento destes dispositivos com filmes de diamante, ao aliar as propriedades excepcionais deste material como a resistência ao desgaste, inércia química, condutividade térmica e velocidade das ondas acústicas superficiais elevadas, entre outras; às vantagens intrínsecas da tecnologia SAW, permite desenvolver e estender o emprego funcional destes dispositivos a uma nova gama operacional de ambientes onde estão sujeitos a um elevado desgaste mecânico, expostos a ambientes quimicamente agressivos ou a temperaturas de algumas centenas de graus centígrados.

O trabalho aqui apresentado descreve o processo de fabrico dos dispositivos e o revestimento com filmes de diamante levado a cabo na Universidade de Aveiro. São ainda sugeridos alguns cenários de aplicação no sector militar em que se antevê um considerável impacto tecnológico ao beneficiar de sensores autónomos e robustos interrogados via um feixe RF que podem cumprir funções de detecção e identificação remota.

1 Introdução

Os dispositivos de onda acústica superficial, abreviadamente designados por SAWs, há muito que se tornaram componentes chave em sistemas de comunicação, e têm sido largamente usados como osciladores, filtros e linhas de atraso durante as últimas três décadas. Longe de estar limitada a aplicações electrónicas e de processamento de sinal, a tecnologia baseada em SAWs constitui ainda uma solução bastante atractiva para outros cenários, incluindo sensores físicos, químicos, ou identificação por interrogação remota com um feixe de RF. Além de serem pequenos, pouco complexos e inerentemente robustos, estes dispositivos têm uma série de vantagens:

1. São dispositivos passivos, isto é, não necessitam de baterias ou alimentação externa, pois respondem com uma fracção da energia com que foram irradiados; quando são usados como sensores, a onda emitida vem modulada de acordo com a grandeza que se pretende medir;
2. São interrogáveis remotamente, logo não é necessária ligação física entre o sensor e a unidade de leitura;
3. Têm tempos de resposta bastante rápidos;
4. São de fácil integração com a tecnologia já existente;
5. Têm um baixo custo de produção, se fabricados em larga escala.

Constituem, assim, a solução por excelência em condições extremas, como locais de difícil acesso, peças em movimento, ambientes perigosos, tóxicos, altamente radioactivos ou zonas contaminadas, onde o uso de sensores convencionais é impossível, dispendioso ou perigoso. Outra aplicação óbvia dos materiais e transdutores piezoeléctricos é em ensaios não-destrutivos da integridade física de estruturas (*Non-Destructive Testing* – NDT), onde um conversor adequado converte o sinal que alimenta os eléctrodos numa onda de superfície que se propaga ao longo do material, e que é novamente convertida num sinal eléctrico. O estado de stress, deformação, ou mesmo a existência de fissuras ou fracturas na estrutura provocam reflexões e difracções da onda de superfície, com tradução directa no espectro do sinal captado. Este cenário, apesar de extremamente relevante, não será alvo de atenção nesta apresentação.

O recente desenvolvimento de materiais piezoeléctricos que funcionam a elevadas temperaturas (transição de fase paraeléctrica a $\sim 1000^{\circ}\text{C}$) permitiu aumentar a gama de temperaturas onde estes dispositivos actuam; porém a ausência de um encapsulamento apropriado limita a sua utilização em locais quimicamente agressivos ou onde exista um elevado desgaste mecânico, como é o caso das indústrias automóvel, aeroespacial,

de extracção petrolífera e em particular os ambientes marítimos, onde a salinidade representa um factor acrescido que compromete tempo de vida e desempenho fiável do equipamento electrónico.

O diamante, sob a forma de filmes finos, aparece como o material ideal que, ao ser integrado com a tecnologia actual, pode melhorar o desempenho dos dispositivos já existentes e aumentar a sua gama de aplicações para cenários actualmente impensáveis.

A investigação que está a ser levada a cabo na Universidade de Aveiro, em conjunto com o Instituto de Telecomunicações (pólo de Aveiro), propõe o desenvolvimento e integração de tecnologias já existentes; baseadas no processo de deposição de filmes finos de diamante em dispositivos SAW, com o objectivo de simplificar a complexidade tecnológica do processo de fabrico e melhorar o desempenho e tempo de vida útil dos dispositivos, tornando viável a sua utilização em ambientes extremamente hostis.

2 Aplicações dos SAWs

2.1 O aparecimento e a evolução dos SAWs

Tal como o nome indica, os SAWs são dispositivos cujo princípio de funcionamento é a propagação de ondas de superfície num sólido. O interesse inicial nestes dispositivos surgiu com a necessidade de aperfeiçoamento dos sistemas de radar durante a II Guerra Mundial. O aparecimento do IDT, um eléctrodo de geometria apropriada que tornou possível a conversão de um sinal eléctrico numa onda de superfície que se propaga ao longo de um substrato piezoeléctrico, surgiu em 1965 e foi um marco no desenvolvimento dos SAWs [1]. Em 1969 foi apresentada a primeira linha de atraso fiável usando IDTs depositados num substrato de niobato de lítio (LiNbO_3). O interesse neste tipo de dispositivos aumentou e, entre 1970 e 1985, os estudos centraram-se na compreensão da propagação e estudo das características dos materiais. No início dos anos 90, os SAWs eram já usados nos sistemas de radar (como filtros de compressão de impulsos), em sistemas de telecomunicações e em produtos para o consumidor final como TV, Rádio, Telemóveis. A partir da segunda metade dos anos 90, o fabrico em massa dos dispositivos e o aparecimento de substratos piezoeléctricos de elevada qualidade (a par da existência de bons modelos matemáticos para o projecto dos IDT e propagação das ondas de superfície), conduziram ao aparecimento de novas aplicações dos SAWs como sensores ou dispositivos de identificação remota passivos [2].

Como já foi referido, os dispositivos de onda superficial são elementos passivos (a energia do sinal emitido como resposta é parte da energia do sinal usado para interrogar o dispositivo) e a interrogação é feita remotamente, por meio de um sinal RF que é captado por uma pequena antena acoplada ao dispositivo. Graças a estas particularidades, os SAWS rapidamente se tornaram os dispositivos por excelência para locais de difícil acesso ou ambientes perigosos sem necessitar de manutenção periódica. Neste momento os SAWs são já utilizados na indústria automóvel, transportes e caminhos-de-ferro, em sistemas de medição de binário, medição da pressão em pneus, controlo de acesso e identificação e ainda na medição de grandezas físicas como, força, deslocamento, pressão, binário e humidade. Mais recentemente foram publicados artigos que relatam a aplicação de dispositivos na indústria aeroespacial e de defesa [2].

2.2 Os SAWs em ambientes hostis

O crescente desenvolvimento tecnológico e diversas questões de ordem económica e ambiental tornaram necessário o desenvolvimento de sensores operacionais em ambientes hostis. A medição de emissões de gases de combustão em tempo real (CO, CO₂, NO_x, H₂), por exemplo, poderá aumentar a eficiência do processo de combustão e reduzir os custos de deslocação e poluição causados pela combustão incompleta do combustível nas indústrias automóvel e aeroespacial. Ainda dentro da indústria automóvel, a medição da pressão no interior da câmara de combustão é uma ferramenta standard na investigação, no desenvolvimento e no controle de qualidade do fabrico dos motores. O aumento da eficiência da produção energética e a busca de processos cada vez mais ecológicos implicam a existência de sensores físicos e químicos operacionais a temperaturas de algumas centenas de graus Celsius ou em ambientes corrosivos onde os sensores ficam sujeitos a um elevado desgaste (por exemplo na melhoria do desempenho de pilhas de combustível e em poços de extracção petrolífera).

Os dispositivos de onda acústica surgem como uma solução simples, versátil e robusta para estes cenários. Tem sido dada especial atenção ao desenvolvimento de sensores para temperaturas elevadas fabricados em materiais piezoeléctricos como o LiNbO₃ ou a langasite (La₃Ga₅SiO₁₄). O grupo de Hauser fabricou e testou sensores de pressão em LiNbO₃ para monitorizar a pressão no interior da câmara de combustão de motores [3], com um sistema de identificação integrado [4]. Estes sensores foram utilizados com sucesso a 500°C; no entanto a degradação óbvia dos IDTs impediu a sua utilização durante períodos de tempo consideráveis a estas temperaturas. A langasite tem sido, até ao presente momento, o material de eleição para o fabrico de protótipos para temperaturas elevadas. Foram já fabricados, com sucesso, sensores de

C₂H₄ e H₂, operacionais a 450°C [5], sensores de CO e H₂ operacionais a 600°C [6] e sensores de temperatura sem fios para a gama 20-700°C [7].

3 – SAWs – a tecnologia

O princípio de funcionamento dos SAWs é muito simples: o sinal eléctrico é captado por uma antena que está ligada a um eléctrodo receptor e é convertido numa onda de planar de superfície – Fig. 1. Esta onda viaja através da superfície do substrato piezoeléctrico e é convertida novamente num sinal eléctrico no eléctrodo emissor.

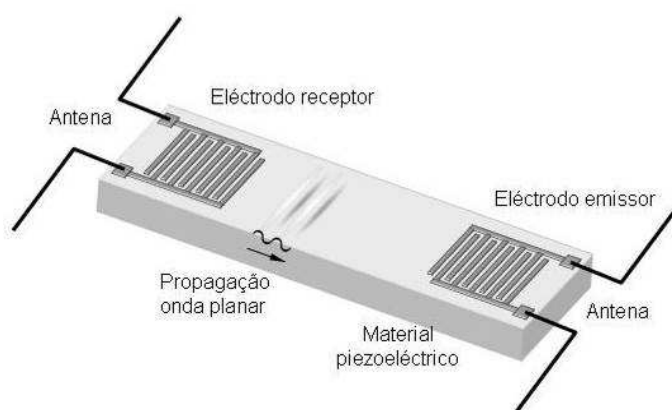


Fig. 1. Desenho esquemático de um dispositivo de onda acústica. NOTA: o dispositivo, a antena e os IDTs não estão desenhados à escala.

3.1 Ondas num sólido

A propagação de ondas de superfície num meio sólido foi inicialmente estudada por Lord Rayleigh [8]. Estas ondas propagam-se a uma velocidade muito mais baixa do que as ondas electromagnéticas, tipicamente entre os 1500 m/s e os 4000 m/s. Estas velocidades de propagação são cerca de 5 ordens de grandeza inferiores à velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no vazio, o que implica que os comprimentos de onda das ondas de superfície sejam igualmente menores que os das ondas electromagnéticas que lhes deram origem.

Graças às baixas velocidades de propagação das ondas de superfície, quando se colocam reflectores na superfície do material piezoeléctrico o dispositivo emite ecos do sinal com que foi irradiado, com tempos de atraso entre os micro e os milissegundos. Este é o princípio utilizado para a leitura de etiquetas de identificação ou medição de grandezas físicas de forma remota utilizando os dispositivos SAW.

Quando uma onda de superfície se propaga num material sólido, a frente de onda força as partículas que o constituem a mover-se em círculo ou elipse, no sentido de propagação da frente de onda – Fig. 2. Fig. 3. Chamam-se ondas de superfície, porque a amplitude do movimento das partículas diminui com a profundidade do material, sendo o seu movimento desprezável para profundidades superiores a um comprimento de onda [8].

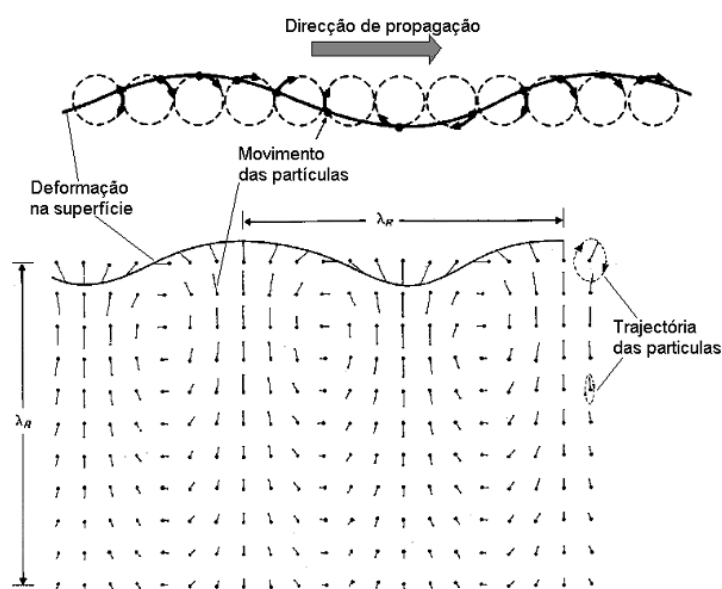


Fig. 2. Propagação de uma onda de superfície e deslocamento das partículas num sólido [2].

3.2 Conversão electro-mecânica: o Transdutor Inter-Digital

O funcionamento de um dispositivo SAW está intimamente associado com a capacidade de conversão de um sinal eléctrico, com uma dada frequência, na onda de superfície que se irá propagar ao longo do substrato piezoeléctrico. Esta conversão é assegurada por eléctrodos metálicos compostos por franjas metálicas de geometria apropriada – o conversor inter-digital (IDT).

A primeira referência ao IDT surgiu em 1965, por White e Voltmer [1], que propuseram um eléctrodo metálico capaz de converter um sinal eléctrico numa onda acústica de superfície num substrato de quartzo (SiO_2), e vice-versa. O IDT consistia num conjunto de franjas metálicas intercaladas estrategicamente e ligadas alternadamente a duas linhas condutoras de alimentação e ligação ao mundo exterior – Fig. 3. A largura das franjas e o espaçamento entre duas franjas consecutivas seria aproximadamente um quarto do comprimento de onda λ da onda de superfície gerada no material. Este transdutor funcionaria de forma recíproca, ou seja, seria capaz de transformar um sinal eléctrico numa frente de onda e vice-versa

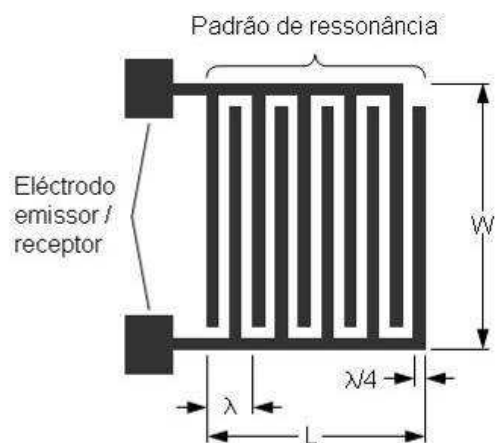


Fig. 3. Esquema de um IDT. As franjas distam $\lambda/4$ umas das outras, em que λ é o comprimento de onda da onda que se propaga no material [1].

A aplicação de um sinal eléctrico no IDT resulta na geração de um campo eléctrico que provoca, por sua vez, a compressão/expansão do material piezoeléctrico. O resultado é a formação de frentes de onda que se propagam pela através da superfície do substrato – Fig. 4.

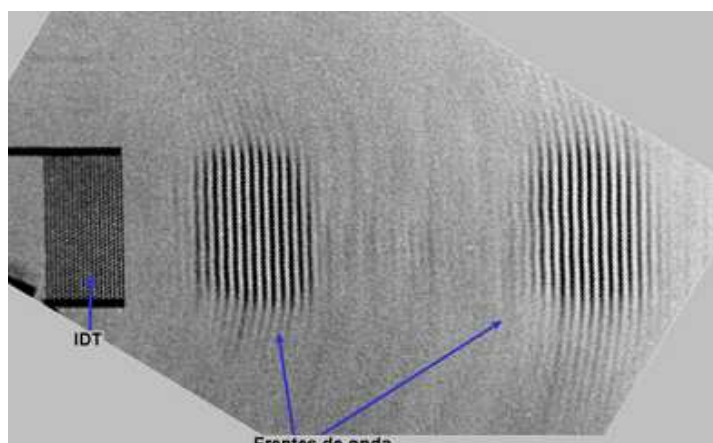


Fig. 4. Imagem de duas fontes de onda geradas por um IDT num substrato piezoeléctrico.

A existência de uma série de eléctrodos apropriados ao longo do substrato pode ser usada para criar um padrão de reflexões do sinal eléctrico recebido. Deste modo, a existência ou ausência de um IDT numa dada posição corresponderá à emissão ou não de uma cópia do impulso, com um dado tempo de atraso. Através desta técnica é possível codificar o sinal emitido pelo dispositivo quando interrogado. Este princípio é usado no fabrico das etiquetas para identificação por RF – Fig. 5.

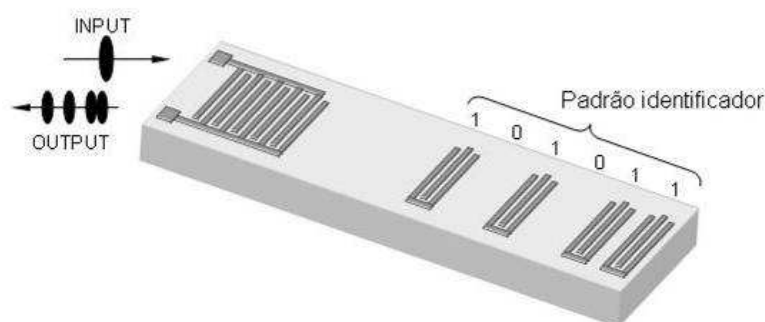


Fig. 5. Esquema de um SAW a funcionar como identificador. O IDT funciona simultaneamente como eléctrodo emissor e receptor. Um conjunto de reflectores dispostos ao longo da superfície do substrato codifica o sinal que irá ser emitido (OUTPUT) em resposta a um impulso recebido (INPUT).

3.3 O substrato piezoeléctrico

Hoje em dia existe uma grande variedade de substratos piezoeléctricos que podem ser adquiridos comercialmente. Entre os mais comuns em aplicações electrónicas encontra-se o PZT ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$), o quartzo (SiO_2) e o niobato de lítio (LiNbO_3). Este último tem uma temperatura de transição de fase (isto é, a temperatura acima da qual o cristal perde as propriedades piezoeléctricas) mais elevada (1150°C , em oposição a 330°C para o PZT e 570°C para o quartzo [9]).

Mais recentemente surgiu uma nova geração de materiais piezoeléctricos com propriedades que os tornam sérios candidatos para o desenvolvimento de sensores operacionais em ambientes hostis, como a langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, que não apresenta temperatura de mudança de fase até à temperatura de fusão, 1470°C), o ortofosfato de gálio (GaPO_4) (temperatura de mudança de fase 900°C) ou ainda materiais da família oxiborato, que não mudam de fase até à sua temperatura de fusão, acima dos 1400°C .

Apesar de alguns materiais serem capazes de suportar temperaturas muito elevadas sem se degradarem, a máxima temperatura de desempenho seguro dos dispositivos não ultrapassa, em norma, os 450°C . Acima desta temperatura a degradação dos IDTs impede a sua utilização por períodos de tempos consideráveis [3].

3.4 Unidade de leitura

Qualquer que seja a aplicação, a resposta de um dispositivo SAW é uma versão distorcida, em amplitude ou fase, do sinal com que foi interrogado. As unidades de leitura destes dispositivos utilizam técnicas similares às dos sistemas de radar. São constituídas por um transmissor e um receptor, geralmente montados no mesmo circuito, o que permite a partilha do oscilador por ambos e a implementação de

detecção coerente. A amostragem do sinal recebido pode ser feita nos domínios do tempo ou da frequência.

3.4.1 Amostragem no domínio do tempo

Quando a amostragem é feita no domínio do tempo a unidade de leitura transmite um impulso de curta duração e o sensor envia um impulso de resposta com um certo tempo de atraso, que contém a informação relativa à grandeza a medir. Na Fig. 6 está esquematizada uma unidade de leitura com amostragem no domínio do tempo.

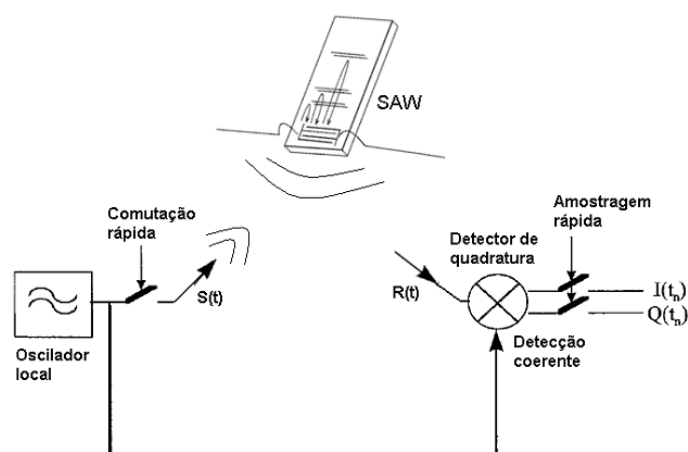


Fig. 6. Esquema de uma unidade de leitura com amostragem no domínio do tempo [2].

A detecção coerente é assegurada pela desmodulação em quadratura do sinal recebido $R(t)$ tendo por referência o oscilador local do circuito de transmissão. O sinal em banda-base é amostrado em instantes temporais t_n com a frequência de amostragem cuidadosamente escolhida de acordo com Teorema de Nyquist, de modo que a janela de amostragem não perturbe as leituras. Os valores obtidos para o sinal em fase ($I(t_n)$) e em quadratura de fase ($Q(t_n)$) são finalmente usados para o cálculo da amplitude e da fase do sinal emitido pelo SAW e este processo é repetido para a obtenção das medidas diferenciais de amplitude e fase para cada um dos reflectores, caso seja necessário [10]. Neste tipo de amostragem o impulso usado para interrogar o dispositivo tem uma largura de banda elevada e uma duração temporal bastante limitada, o que pode limitar a distância de leitura.

3.4.2 Amostragem no domínio da frequência

A deformação resultante da aplicação do campo eléctrico ao substrato provoca a alteração da velocidade de propagação das ondas de superfície, o que faz variar a frequência dos ecos do sinal. Tirando partido desta característica, na amostragem no domínio da frequência são usados impulsos temporalmente longos e com frequência

variável. O sensor irá responder com um eco à frequência para a qual o seu transdutor interdigital de excitação se encontra “sintonizado” como consequência da deformação imposta ao substrato. A informação proveniente do sensor no domínio do tempo poderá ser obtida implementando, por exemplo, um algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) num micro controlador. Na Fig. 7 está esquematizada uma unidade de leitura com amostragem no domínio da frequência.

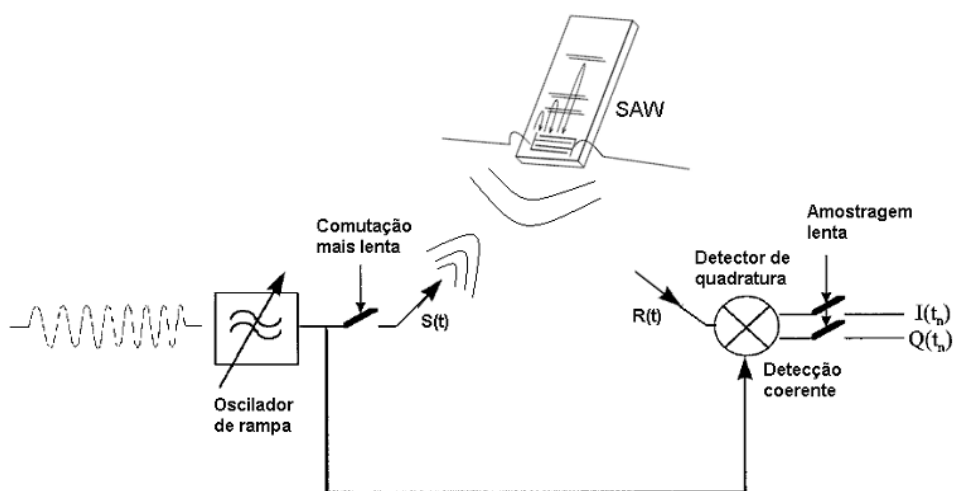


Fig. 7. Esquema de uma unidade de leitura com amostragem no domínio da frequência [2].

Neste tipo de amostragem, a resposta do SAW é medida para cada uma das frequências presentes no sinal $S(t)$. Tal como no caso da amostragem no domínio do tempo, a frequência do oscilador local do circuito de transmissão assegura a detecção coerente do sinal no receptor. Como o processo tem de ser repetido para cada uma das frequências, o ciclo de leitura é mais longo, pelo que esta técnica só pode ser usada para medidas relativamente lentas; no entanto, a distância de interrogação aumenta e a relação sinal ruído é superior ao caso anterior [10].

3.5 Sensores físicos / de temperatura, pressão, deformação ou stress

O princípio de funcionamento dos dispositivos SAW como sensores de grandezas físicas (pressão, temperatura, deformação, tensão, etc) é extremamente simples, e tem por base a variação das características de propagação da onda no substrato piezoeléctrico, como uma função da grandeza que se deseja medir. A grandeza que tem a variação mais significativa é a velocidade de propagação das ondas.

Além do eléctrodo receptor, o dispositivo terá um ou mais reflectores, que garantem a re-emissão de uma cópia atenuada do sinal com que foi irradiado passado um certo tempo. Quando a velocidade de propagação da onda varia em função de um

determinado parâmetro, este tempo de atraso também varia, e a sua medição precisa é uma medida indirecta do parâmetro em questão.

Além da aplicação como sensores de pressão [3] e temperatura [7], os dispositivos SAW podem, por exemplo, ser usados em sistemas de controlo de tracção dos veículos para medir o binário em pontos estratégicos do sistema de tracção [11].

Humidade e campo magnético são outras grandezas que podem ser medidas indirectamente utilizando dispositivos SAW. Neste caso liga-se uma impedância de carga variável a um dos portos – Fig. 8, o que provoca a variação da reflectividade de um dos transdutores interdigitais em função da grandeza que se pretende medir. O SAW é visto como uma linha de transmissão com atraso, na qual a amplitude e/ou a fase do sinal reflectido são função da desadaptação provocada pela variação da impedância de carga ligada no fim da linha [2].

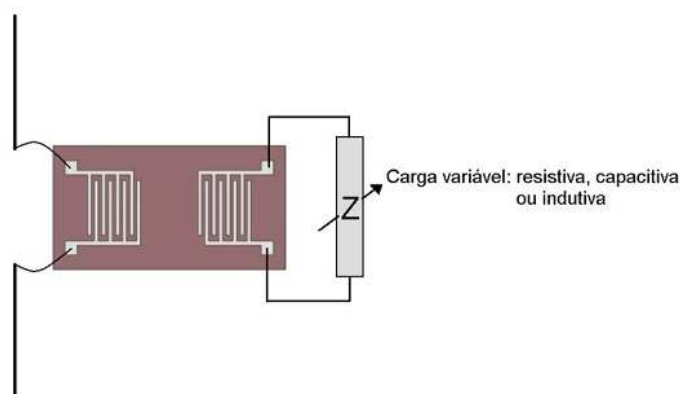


Fig. 8. Esquema de um sensor em que a medição da grandeza física é feita variando a impedância de carga de um dos portos [2].

Uma área onde se prevê que os SAWs venham a desempenhar um papel de relevo é na monitorização de estruturas, substituindo por exemplo os extensómetros que se utilizam actualmente na construção civil. Outro tipo de estruturas, como navios, veículos de grande porte ou estruturas metálicas, podem também beneficiar com esta tecnologia. Neste caso, os locais mais susceptíveis de fadiga ou dano podem ser continuamente monitorizados de uma maneira preventiva e não-invasiva. Os sensores SAW podem tanto fazer parte integrante da estrutura (sendo inseridos durante o processo de construção/fabrico) como ser colocados posteriormente nos locais considerados críticos ou estratégicos. Além das vantagens imediatas da uma tecnologia sem fios e passiva, a possibilidade de identificar inequivocamente cada um dos dispositivos através do código de reflectores facilita imenso o processo de leitura e aquisição de dados.

3.6 Sensores químicos

Os sensores químicos fabricados com SAWs têm por base a absorção de moléculas por um filme (que constitui a parte “activa” do sensor) previamente depositado na superfície do material piezoeléctrico. Quando as moléculas são absorvidas, a massa varia, o que induz uma mudança da velocidade de propagação das ondas. A “quantidade” de massa absorvida pode pois ser medida indirectamente através do tempo de atraso dos ecos ou, mais frequentemente, através da variação da frequência de oscilação do SAW, que é fabricado de modo a se comportar como um oscilador. O tipo de moléculas que podem ser detectadas depende da sensibilidade particular do filme depositado.

Esta é uma área particularmente promissora da tecnologia SAW, numa altura em que a detecção de certos gases ou compostos assume uma grande importância em termos ambientais, económicos, energéticos ou mesmo de segurança. Os curtos tempos de resposta destes sensores (poucos segundos) viabiliza a sua utilização em metrópoles modernas (por exemplo estações de metro e locais públicos com elevada concentração populacional) como forma de monitorização e alarme de eventuais ataques terroristas, ou concentração excessiva de gases tóxicos provenientes de indústrias, transportes ou acidentes graves. Para aplicações militares destaca-se a capacidade de detecção simultânea de agentes químicos, biológicos e nucleares por dispositivos híbridos. A elevada sensibilidade destes dispositivos possibilita, por exemplo, a detecção de baixíssimas concentrações de agentes nervosos como os gases sarin e mostarda, explosivos derivados do azoto como o TNT e RDX [2].

3.7 Etiquetas para identificação por RF

A utilização dos SAWs como etiquetas de identificação já foi aqui referida. Para além da vantagem óbvia do funcionamento sem alimentação, estes dispositivos podem ser interrogados milhares de vezes por segundo, o que os torna uma boa solução na identificação de objectos que se movem com rapidez. Estas etiquetas são usadas principalmente na identificação de objectos, no controlo automático de processos fabris e na identificação de veículos em movimento [2]. É possível aliar a capacidade medição e identificação no mesmo dispositivo, o que possibilita a instalação de sensores espacialmente próximos sem causar dificuldades na identificação do sensor que originou um dado sinal [4].

Uma etiqueta de identificação baseada em SAWs é constituída simplesmente por um IDT e uma área de codificação, onde ocorrem as diferentes reflexões da onda de superfície. Para obter o “código” da etiqueta, usam-se reflectores (eléctrodos de largura $\lambda/4$ abertos ou em curto-circuito) separados electricamente ou então ligam-se

IDTs na mesma linha – Fig. 9. Normalmente a distância que separa o IDT e a zona de codificação é superior, o que garante um atraso adicional no sinal de resposta que evita as interferências dos ecos ambientais relacionados com o sinal de leitura.

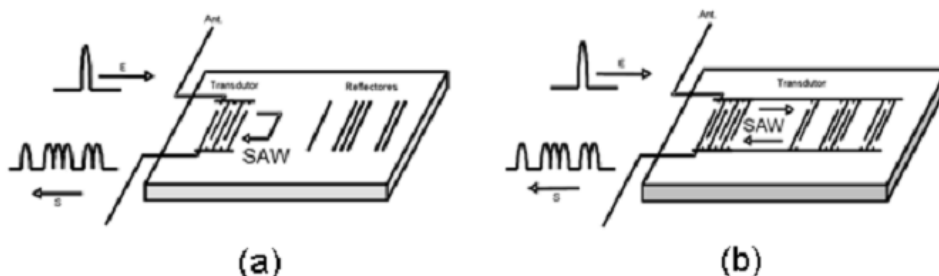


Fig. 9. Diferentes estruturas usadas na codificação das etiquetas de identificação fabricadas com dispositivos SAW: (a) reflectores separados e (b) transdutores ligados na mesma linha [2].

Existem já soluções comerciais de sistemas de identificação RFID baseados em SAWs. As distâncias de leitura variam entre os 5 e os 10 m em sistemas na banda ISM (433,05 a 434,79 MHz) e 1 a 2 m na banda ISM (2,4 a 2,5 GHz) [2].

4 O diamante

Além da utilização óbvia em joalheria, o diamante é um material com várias aplicações industriais, das quais se destacam a indústria de corte e ferramentas [12]. No entanto, as suas propriedades eléctricas superiores (banda de energias proibida, campo eléctrico de *breakdown*, mobilidade de electrões e lacunas, condutividade térmica) despertaram há já algumas décadas o interesse da comunidade científica internacional [13] para a sua utilização no fabrico de dispositivos.

As propriedades intrínsecas dos filmes de diamante (uma película de diamante depositada num substrato apropriado) tornam-nos um material excelente para protecção e passivação de superfícies, protegendo os dispositivos e evitando a degradação do seu desempenho com o tempo. A elevada condutividade térmica do diamante contribui ainda para aumentar a potência nominal de funcionamento dos dispositivos.

Apesar de o diamante não ser um material piezoeléctrico, a velocidade de propagação das ondas acústicas neste material é extremamente elevada [14] (19000 m/s na direcção [111] contra 8900 m/s no SiO₂). Assim sendo, a utilização combinada do diamante e de um material piezoeléctrico convencional abre a porta ao fabrico de dispositivos mais rápidos e compactos. A frequência de operação f de um dispositivo SAW é dada pela relação $f = v/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda da onda que se propaga com velocidade v no material piezoeléctrico. O aumento da frequência

implica a diminuição do tamanho dos eléctrodos. No entanto, esta diminuição implica o recurso a tecnologias mais dispendiosas e pode comprometer a capacidade de injectar potência no dispositivo. Num dispositivo híbrido (material piezoeléctrico revestido com diamante), a elevada velocidade de propagação das ondas acústicas no diamante leva ao aumento da frequência de operação para o mesmo tamanho dos eléctrodos.

Por outro lado, o revestimento com diamante é, por si só, o encapsulamento por excelência. Um filme de algumas dezenas de microm de espessura é suficiente para garantir a protecção perfeita do material piezoeléctrico e dos IDTs contra ambientes quimicamente reactivos ou com elevados níveis de radiação, contra o desgaste físico, etc. Este encapsulamento pode abranger o dispositivo e a própria antena, contrariamente ao que acontece com as tecnologias actuais. Finalmente, o diamante é um óptimo dissipador térmico, o que possibilita operação dos dispositivos com mais a temperaturas mais elevadas (uma vez que, para o mesmo nível de potência, uma dissipação térmica mais eficiente significa uma temperatura de funcionamento mais baixa).

A aplicação dos filmes de diamante não está limitada aos dispositivos SAW. Dependendo dos parâmetros de deposição e da espessura, os filmes de diamante podem ser totalmente transparentes, constituindo o revestimento ideal por exemplo para aplicações ópticas, protegendo as lentes ou outras peças sensíveis do desgaste físico e/ou corrosão.

4.1 Técnicas de deposição

Os cristais de diamante há muito que são sintetizados em laboratório, a partir de métodos a alta pressão e alta temperatura. O resultado é a síntese de cristais de diamante em condições onde este é termodinamicamente mais estável do que o grafite [15].

A deposição química a partir da fase vapor é um outro método que pode ser usado para depositar diamante num substrato apropriado, sob a forma de filmes finos [16]. Neste caso, a deposição de diamante acontece a partir de um fluxo de metano diluído em hidrogénio (tipicamente 1 a 3% de metano), a pressões entre 10 e 50 torr, numa mistura activada através de um filamento aquecido ou de um plasma próximo de um substrato. As temperaturas do substrato estão tipicamente compreendidas entre 700 e 1000°C. A Fig. 10 representa esquematicamente o processo genérico de deposição de diamante por CVD.

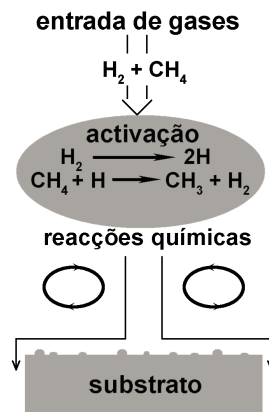


Fig. 10. Diagrama representativo dos principais elementos no processo CVD.

Existem vários tipos de CVD, denominados em função do meio utilizado para criar os radicais de carbono. Os mais comuns para a deposição de filmes de diamante são o *Hot-Filament* (HFCVD) e o *Microwave Plasma* (MPCVD) CVD, nos quais a activação dos radicais é conseguida por intermédio de um filamento ou de radiação microondas de elevada potência, respectivamente [17].

No caso do HFCVD, é usado um filamento, geralmente de tântalo ou de tungsténio, aquecido a cerca de 2100 °C. A elevada energia térmica quebra as ligações químicas das moléculas de metano CH_4 e H_2 e cria os radicais de carbono e hidrogénio atómico necessários para o crescimento do filme.

No MPCVD, o plasma é iniciado numa mistura de CH_4 e H_2 através de radiação microondas de elevada potência (tipicamente 1 a 4 KW) e fica em contacto com o substrato. A deposição de diamante acontece através das reacções químicas entre radicais presentes no plasma.

Como resultado das reacções químicas à superfície, os átomos de carbono presentes na fase gasosa ligam-se aos átomos de carbono do substrato; o hidrogénio atómico quebra as ligações não- sp^3 , limpando a fase grafítica, e apenas as ligações sp^3 são mantidas. O resultado é o revestimento do substrato com um filme de diamante. A espessura depende obviamente do tempo de deposição e as características macroscópicas do filme (como rugosidade, tamanho de grão, etc) dependem das condições particulares da deposição.

Este método é extremamente versátil e permite depositar filmes contínuos de diamante em substratos de geometrias variadas.

4.2 SAWs com diamante

A integração do diamante em dispositivos SAW tem atraído muito interesse por parte da comunidade científica [18-23]. A metodologia normalmente adoptada tem por base

a deposição do material piezoelétrico na superfície de um filme de diamante, previamente depositado por CVD num substrato apropriado (normalmente silício). Apesar de esta ser uma tecnologia bastante madura e a qualidade do filme poder ser modulada pelas condições de deposição, existem alguns problemas. O diamante deve ter uma espessura comparável a alguns comprimentos de onda, para evitar que o substrato de silício influencie a propagação das ondas [23]. A rugosidade dos filmes de diamante aumenta com a espessura dos mesmos, e é responsável por fenómenos de dispersão e perdas de propagação, pelo que deve ser reduzida ao mínimo. O polimento mecânico da superfície do diamante é uma solução [19], no entanto esta técnica é dispendiosa e morosa. A utilização de filmes de nanodiamante, em que o tamanho dos grãos é da ordem dos nanómetros, permite contornar o problema da rugosidade [20], contudo a resistividade superficial dos filmes inviabiliza a deposição directa dos IDTs e a inércia química reduzida compromete o papel do diamante enquanto camada protectora. Uma abordagem diferente é a deposição do material piezoelétrico directamente na superfície de nucleação do diamante (após a remoção do substrato onde ele foi depositado) [21,22], no entanto isto envolve a deposição de filmes auto-sustentados e, portanto, de espessura considerável.

Atendendo às desvantagens das técnicas utilizadas actualmente, a integração definitiva do diamante com a tecnologia SAW está dependente de um novo processo de fabrico dos dispositivos. Neste sentido, os investigadores da UA estão a desenvolver um processo inverso de fabrico dos dispositivos, onde o diamante é depositado directamente na superfície do material piezoelétrico. Contrariamente às técnicas já documentadas, este processo permite simplificar ao máximo o processo de fabrico dos dispositivos: a tecnologia madura actualmente utilizada no fabrico dos SAWs (incluindo o fabrico dos substratos e o projecto dos IDTs) é simplesmente seguida por uma nova etapa onde o diamante é depositado directamente no dispositivo, imediatamente antes do que seria o encapsulamento do mesmo. Para manter as perdas de propagação dentro de níveis aceitáveis, a deposição do diamante será feita segundo uma técnica optimizada pelos investigadores da Universidade de Aveiro [24], que assegura uma interface contínua e homogénea entre a face de nucleação do diamante e o material onde ele é depositado.

5 Conclusões

Os sensores e etiquetas RF baseados na tecnologia SAW constituem uma solução passiva e sem fios, ideal para utilização em ambientes hostis e/ou locais de difícil acesso. Os recentes desenvolvimentos no fabrico de materiais piezoelétricos com elevadas temperaturas de mudança de fase levaram já ao fabrico de sensores operacionais a temperaturas superiores a 500°C. No entanto, o desempenho destes

dispositivos está ainda condicionado, entre outros factores, pela destruição dos IDTs para temperaturas superiores a 450°C.

O diamante, por outro lado, é um material que tem recebido um grande interesse por parte da comunidade científica para o desenvolvimento de dispositivos electrónicos, em particular para o fabrico de SAWs mais rápidos e robustos. Além de permitir aumentar a frequência de operação dos dispositivos sem exigir o acesso a técnicas de fotolitografia mais dispendiosas para a deposição dos IDTs, o revestimento dos SAWs com um filme de diamante oferece o encapsulamento e protecção ideais para o fabrico de dispositivos operacionais em ambientes até hoje impensáveis. No entanto, as metodologias utilizadas actualmente padecem de algumas limitações de ordem tecnológica e económica. Estas limitações poderão ser ultrapassadas pelo método de fabrico proposto pelos investigadores da Universidade de Aveiro e do Instituto de Telecomunicações de Aveiro e levar ao desenvolvimento de uma nova geração de sensores e etiquetas RF passivos e sem fios para aplicação em ambientes hostis.

6 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), que financia esta investigação com o projecto PTDC/EEA-TEL/104004/2008 "Dispositivos de onda superficial em filmes de diamante: um sistema inverso de fabrico". A Doutora Joana Catarina Mendes gostaria ainda de agradecer à FCT a atribuição da bolsa de investigação SFRH/BPD/24615/2005-

Referências Bibliográficas

- [1] R.M. White, F.W. Voltmer, *Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves*, Appl. Phys. Lett. 7 (1965) 314-316
- [2] D.P.T. Macário, *Utilização de dispositivos de onda superficial como sensores e identificadores* (Tese de Mestrado) (2007) Universidade de Aveiro
- [3] R. Hauser, L. Reindl, J. Biniash, *High-temperature stability of LiNbO₃ based SAW devices*, IEEE Ultrason. Symp. (2003) 192-195
- [4] G. Bruckner, R. Hauser, A. Stelzer, L. Maurer, L. Reindl, R. Teichmann, J. Biniash, *High temperature stable SAW based tagging system for identifying a pressure sensor*, Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. PDA Exhib. (2003) 942-947
- [5] J.A. Thiele, M. Pereira da Cunha, *High temperature SAW gas sensor on langasite*, Proc. IEEE Sens. 2 (2003) 769-772
- [6] D. Richter, H. Fritze, T. Schneider, P. Hauptmann, N. Bauersfeld, K.-D. Kramer, K. Wiesner, M. Fleischer, G. Karle, A. Schubert, *Integrated high temperature gas sensor system based on bulk acoustic wave resonators*, Sens. Act. B 118 (2006) 466-471
- [7] S.-Q. Wang, J. Harada, S. Uda, *A wireless surface acoustic wave temperature sensor using langasite as substrate material for high-temperature applications*, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) 6124-6127
- [8] L. Rayleigh, *On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid*, Proc. London Math. Soc. S1-17 (1885) 4-11
- [9] S. Zhang, R. Xia, L. Lebrun, D. Anderson, T.R. Shrout, *Piezoelectric materials for high power, high temperature applications*, Mater. Lett. 59 (2005) 3471-3475
- [10] A. Pohl, *A review of wireless SAW sensors*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control 47 (2000) 317-332
- [11] J. Gierut, R. Lohr, *Automotive Power Train & Chassis Torque Sensor Technology*, Honeywell (2005)

- [12] <http://www.idr-online.com/>
- [13] J.J. Brophy, *Preliminary study of the electrical properties of a semiconducting diamond*, Phys. Rev. 99 (1955) 1336-1337
- [14] S.-F. Wang, Y.-F. Hsu, J.-C. Pu, J.C. Sung, L.G. Hwa, *Determination of acoustic wave velocities and elastic properties for diamond and other hard materials*, Mat. Chem. Phys. 85 (2004) 432-437
- [15] H. Kanda, T. Sekine, *High temperature high pressure synthesis of single crystal diamond*, Properties, growth and applications of diamond, INSPEC (2001) 247-255
- [16] J.E. Butler, D.G. Goodwin, *CVD growth of diamond, Properties, growth and applications of diamond*, INSPEC (2001) 262-272
- [17] *Low pressure diamond – Manufacturing and applications*, Ed. B. Dischler, C. Wild, Springer 1998
- [18] F.R. Kloss, L.A. Francis, H. Sternschulte, F. Klauser, R. Gassner, M. Rasse, E. Bertel, T. Lechleitner, D. Steinmüller-Nethl, *Commercial developments of nanocrystalline diamond — Two prototypes as case studies*, Diam. Rel. Mat. 17 (2008) 1089-1099
- [19] S. Shikata, H. Nakahata, K. Higaki, S. Fuji, H. Kitabayashi, K. Tanabe, Y. Seki, *SAW device application of diamond*, 18th IEEE International CPMT (1995) 379-382
- [20] Y.C. Lee, S.J. Lin, V. Buck, R. Kunze, H. Schmidt, C.Y. Lin, W.L. Fang, I.N. Lin, *Surface acoustic wave properties of natural smooth ultra-nanocrystalline diamond characterized by laser-induced SAW pulse technique*, Diam. Rel. Mat. 17 (2008) 446-450
- [21] T. Lamara, M. Belmahi, O. Elmazria, L. Le Brizoual, J. Bougdira, M. Rémy, P. Alnot, *Freestanding CVD diamond elaborated by pulsed-microwave-plasma for ZnO/diamond SAW devices*, Diam. Rel. Mat. 13 (2004) 581-584
- [22] F. Bénédic, M.B. Assouar, P. Kirsch, D. Monéger, O. Brinza, O. Elmazria, P. Alnot, A. Gicquel, *Very high frequency SAW devices based on nanocrystalline diamond and aluminum nitride layered structure achieved using e-beam lithography*, Diam. Rel. Mat. 17 (2008) 804-808

[23] M. Benetti, D. Cannatà, F. Di Pietrantonio, E. Verona, *Growth of AlN Piezoelectric Film on Diamond for High-Frequency Surface Acoustic Wave Devices*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control 52 (2005) 1806-1811

[24] S.Z. Rotter, J.C. Madaleno, *Diamond CVD by a Combined Plasma Pretreatment and Seeding Procedure*, J. Chem. Vap. Depos. 15 (2009) 209–216