

«target» de uma câmara de vídeo. Evita-se desta forma o processamento químico e o reposicionamento da placa holográfica. Este método é normalmente designado por “Electronic Speckle Pattern Interferometry” ou ESPI, e foi inicialmente estudado por Butters e Leendertz [2].

Aplicações

A nível da Metrologia pode-se falar em vários métodos de aplicação, sendo talvez os mais importantes a fotografia de granitado Laser e a interferometria de granitado Laser. A distinção entre os dois não é fácil dado ambos envolverem registo do granitado Laser e interferometria. Na fotografia de granitado Laser considera-se a existência de uma rede intimamente ligada à superfície do objecto e que acompanha os movimentos desta. A informação é obtida pela análise da deformação sofrida pela rede. Na interferometria de gra-

nitado Laser a informação é obtida pela correlação entre duas manchas de granitado Laser.

Estas duas técnicas de granitado Laser tornam possível medidas na gama de 100 μm a 0.1 μm sendo possível ampliar esta gama com técnicas de heterodinagem.

As Figs. 6 e 7 mostram exemplos de aplicações das técnicas de granitado Laser no estudo de vibrações de deformações, tendo sido obtidas com o sistema de ESPI por nós desenvolvido.

Além das citadas aplicações esta técnica permite analisar a forma da superfície («contouring»), deformações, vibrações, movimentos de fluídos, citando apenas os de uso mais corrente.

- [1] J. W. GOODMAN — Laser Speckle and Related Phenomena. J. C. DAINTY, Spring-Verlag: Berlim (1975).
- [2] J. N. BUTTERS e J. A. LEENDERTZ — Journal of Measurement and Control, 4 (1971).

Ondas térmicas na análise não destrutiva de materiais

M. ZAMITH SILVA e J. A. FERREIRA

Laboratório de Física, Universidade do Minho

1. Introdução

A utilização de ondas térmicas na análise não destrutiva de materiais é uma técnica recente que permite detectar e representar as características térmicas de uma amostra, quer à superfície, quer na região imediatamente subjacente. Nesta técnica são criadas ondas térmicas usando um feixe intenso de energia, habitualmente um laser ou um feixe de electrões, modulado em intensidade e focado na amostra.

Foi a partir do efeito fotoacústico [1], descoberto há mais de um século por Alexander Graham Bell [2], que esta técnica se desenvolveu. Bell verificou que, se interrompesse periodicamente um feixe de luz focado sobre um diafragma num tubo auditivo, podia obter

um sinal audível. Dado não existirem na altura detectores sensíveis que permitissem quantificar os sinais acústicos, esta descoberta foi rapidamente esquecida e, quando ressurgiu, o então chamado *efeito optoacústico* foi inexplicavelmente aplicado apenas a amostras gasosas. Desde que, nos últimos anos, passou a ser utilizado também no estudo de sólidos e líquidos, o efeito fotoacústico encontrou aplicações em numerosas áreas de investigação, desde a física e a química até à biologia e à medicina.

Tendo-se concluído que o sinal fotoacústico dependia não só das propriedades ópticas da amostra mas também das suas características térmicas, dado que o efeito era decomponível num efeito fototérmico seguido de um efeito termoacústico, procuraram-se métodos alternativos para detectar as ondas térmicas criadas

na amostra, que serviriam para detecção e caracterização de variações locais das propriedades térmicas. Os parâmetros que podem ser estudados por este processo são a densidade, o calor específico e, sobretudo, a condutividade térmica.

Entre as principais aplicações da técnica incluem-se o estudo de superfícies, películas finas, semicondutores, revestimentos metálicos e isoladores, e amostras biológicas.

2. Criação e detecção das ondas térmicas

Quando um feixe laser é focado numa pequena área de uma amostra, a radiação incidente pode ser absorvida, dando-se um aquecimento na região da absorção: à superfície ou na sua vizinhança se a amostra for opaca, em impurezas ou defeitos internos se a amostra for transparente à radiação utilizada. Modulando a intensidade do feixe incidente, a frequências normalmente compreendidas entre 10 Hz e 10 MHz, o aquecimento periódico provocado será a fonte de ondas térmicas. Estas ondas são fortemente amortecidas e a sua amplitude torna-se desprezável ao fim de um ou dois comprimentos de onda. No entanto, dentro do seu raio de alcance, as ondas térmicas interactuam com as heterogeneidades térmicas da amostra, de modo matematicamente equivalente aos processos de difusão e reflexão de ondas convencionais. Efectuando um varrimento do feixe laser através da superfície da amostra e registando a resposta em cada ponto, é possível obter um mapa ou imagem das suas características térmicas. A resolução máxima atingível depende das dimensões do feixe focado e do comprimento de onda térmico, dado por:

$$\lambda_t = 2\pi \sqrt{\frac{2k}{\rho C \omega}}$$

em que $\omega = 2\pi\nu$, sendo ν a frequência de modulação em Hertz, k é a condutividade térmica, ρ a massa volúmica e C o calor

específico. Pode mostrar-se que a resolução está limitada a $\sim \lambda_t/2\pi$.

Todos os métodos de detecção das ondas térmicas reflectidas e difundidas pelas heterogeneidades térmicas da amostra recorrem à medição de um de dois efeitos por elas provocado: a variação local da temperatura da superfície e o sinal termoelástico na amostra. Antes de descrevermos os métodos, convém realçar que qualquer deles permite detectar e representar descontinuidades térmicas no interior da amostra, seja esta transparente ou opaca, até uma profundidade de poucos comprimentos de onda térmica. Uma vez que λ_t depende da frequência de modulação, ao diminuir esta é possível aumentar o alcance em profundidade, embora à custa de uma perda de resolução. (Tipicamente, para um isolador térmico, se $\nu = 1$ MHz virá $\lambda_t \sim 0,5 \mu\text{m}$ e se $\nu = 100$ Hz; $\lambda_t \sim 50 \mu\text{m}$).

O sinal fornecido por qualquer dos transdutores utilizados nos diferentes métodos de detecção é amplificado usando um amplificador *lock-in* que, tendo como referência o sinal modulador, mede a amplitude e também a fase do sinal detectado. Deste modo, para uma mesma frequência, podem obter-se *imagens térmicas* da amostra a diferentes profundidades (dentro do alcance correspondente a essa frequência) variando a fase de detecção. Como alternativa podem usar-se lasers pulsados e estudar a variação do sinal ao longo do tempo, após cada impulso de radiação [3].

Devido às condições periódicas de tensão-deformação na região aquecida, são produzidas ondas termoelásticas. Estas ondas têm a mesma frequência das ondas térmicas que as originam, mas os comprimentos de onda são muito superiores (alguns milímetros para $\nu = 1$ MHz). A amplitude e a fase das ondas termoelásticas estão directamente relacionadas com os perfis de temperatura no volume aquecido, sendo portanto directamente afectadas pela presença de ondas térmicas difundidas ou reflectidas e funcionando meramente como transportadores ou amplificadores da informação contida nestas (Fig. 1).

Um dos métodos de detecção das ondas termoelásticas utiliza um transdutor piezoelétrico em contacto acústico com a amostra [4]. O método tem a vantagem de permitir a utilização de frequências muito elevadas (~ 10 MHz), sendo portanto indicado para as aplicações em microscopia com ondas térmicas. O emprego destes transdutores tem a desvantagem de exigir contacto com a amostra.

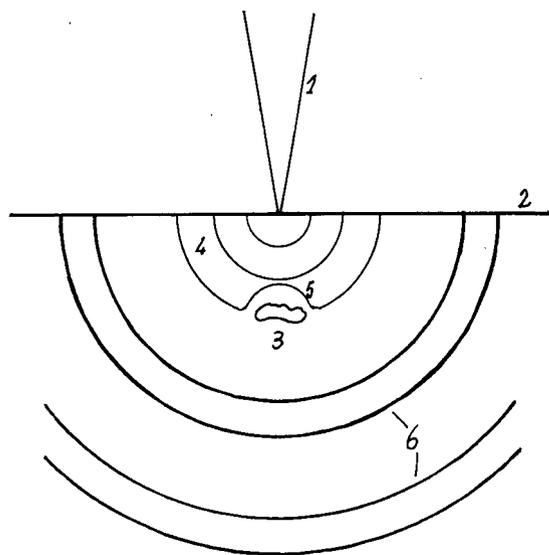


Fig. 1 — Processos físicos envolvidos na interação das ondas térmicas com uma heterogeneidade térmica (adaptado da ref. [11]). 1. Feixe laser focado, 2. Superfície da amostra, 3. Heterogeneidade térmica, 4. Ondas térmicas incidentes, 5. Onda térmica reflectida. 6. Ondas termoelásticas.

É possível detectar a deformação termoelástica da superfície da amostra na zona de incidência do feixe de excitação, recorrendo-se para esse fim a um feixe de prova (normalmente de um laser de Hélio-Néon). Há pelo menos dois processos alternativos de medir essa deformação [5]: *a*) um método interferométrico em que a superfície da amostra funciona como o braço de um interferómetro de Michelson convencional; *b*) um processo em que o feixe de prova incide normal ou obliquamente à superfície da amostra, próximo da zona de incidência do feixe excitador, sendo a

deflexão periódica devida à vibração da superfície detectada por um sensor de posição. Qualquer dos processos mede a sobreposição de dois efeitos, a deformação da superfície e a variação do índice de refração do ar junto à mesma, causada pelo gradiente de temperatura aí existente.

Este último efeito pode ser usado noutro método em que o feixe de prova passa paralelamente à superfície e próximo desta. A deflexão periódica deste feixe é detectada também com um sensor de posição [6]. Esta técnica e a anterior são extremamente sensíveis e evitam o contacto com a amostra, mas exigem um alinhamento perfeito dos componentes ópticos e ausência de vibrações.

As variações de temperatura da superfície da amostra podem ser medidas através das variações da reflectividade [7], usando um feixe de prova que incide normalmente à superfície na zona do feixe modulador, ou pelo método mais directo, que emprega um detector de infravermelhos [8]. Para que a sensibilidade deste método seja comparável à de outros, é necessário o recurso a detectores que funcionam a baixas temperaturas ($< 77\text{K}$).

O microfone foi o primeiro detector usado em fotoacústica e na análise não destrutiva com ondas térmicas [9]. Embora o método seja muito sensível, tem alguns inconvenientes graves: a amostra tem de ser colocada numa célula de dimensões reduzidas, não permite a utilização de frequências superiores a cerca de 10 KHz e o sinal pode ser difícil de interpretar por ser composto por duas contribuições, uma devida à variação da temperatura superficial da amostra e outra causada pela vibração da superfície.

Qualquer dos métodos citados é sensível a pelo menos mais um parâmetro da amostra, que pode variar localmente: coeficiente de expansão e constantes elásticas da zona aquecida, estado, morfologia e emissividade da superfície. No entanto, a diversidade de métodos de detecção é um dos principais atractivos da técnica na análise não destrutiva de materiais.

3. Exemplos de aplicações

Uma vez que é já muito elevado o número de aplicações das ondas térmicas neste campo, não é possível fazer aqui a sua enumeração exaustiva. Seleccionaram-se alguns exemplos de aplicações que fossem representativos dos diversos métodos de detecção. Na ref. [10] pode ser encontrado um conjunto bastante completo de aplicações actuais.

Um dos principais objectivos iniciais da investigação com ondas térmicas foi a sua aplicação à microelectrónica. Neste campo os transdutores piezoeléctricos têm a vantagem de permitir grande resolução, tendo sido aplicados em circuitos integrados na detecção de microfracturas, controlo da implantação de dopantes e estudo do perfil em profundidade [11].

A detecção por interferometria da deformação superficial foi utilizada para localizar defeitos de falta de adesão entre revestimentos e substractos [12]. Na zona de adesão deficiente, a principal contribuição para o sinal é devida ao empolamento do filme.

Usando um feixe de prova normal à superfície para detectar a sua deformação é possível medir com precisão a espessura de filmes finos, transparentes ou opacos, de um modo não destrutivo e sem contacto [13].

Uma das aplicações tecnológica e comercialmente mais importantes utiliza a detecção da reflectividade da superfície para controlar o processo de implantação iónica em silício, podendo ser aplicada tanto aos próprios circuitos impressos como a pastilhas de teste [14]. O método é não destrutivo, sem contacto, apresenta grande sensibilidade à dose de iões implantados e resolução espacial da ordem do micrometro.

As alterações físicas e químicas em películas de tinta durante envelhecimento acelerado podem ser caracterizadas medindo, com um detector de infravermelhos, a variação de temperatura à superfície após excitação com um impulso laser [15].

Tanto a célula com microfone como a deflexão de um feixe de prova paralelo à superfície da amostra podem ser usadas na detecção de fracturas subsuperficiais em sólidos opacos, tendo a comparação entre estes dois métodos revelado uma ligeira superioridade do segundo pois a célula com microfone não permite detectar fracturas verticais (paralelas ao feixe excitador) [16].

REFERÊNCIAS

- [1] ROSENCWAIG, A. — Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [2] BELL, A. G. — *Philos. Mag.*, **11**, 510 (1881).
- [3] CIELO, P. — *J. Appl. Phys.*, **56**, 230 (1984).
- [4] BUSSE, G. and ROSENCWAIG, A. — *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 815 (1980).
- [5] OLMSTEAD, M. A., AMER, N. M., KOHN, S., FOURNIER, D. and BOCCARA, A. C. — *Appl. Phys.*, **A32**, 141 (1983).
- [6] BOCCARA, A. C., FOURNIER, D. and BADOZ, J. — *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 130 (1980).
- [7] ROSENCWAIG, A., OPSAL, J., SMITH, W. L. and WILLENBORG, D. L. — *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 1013 (1985).
- [8] NORDAL, P.-E. and KANSTAD, S. O. — In *Scanned Image Spectroscopy*, ed. E. A. ASH; Academic Press, London, 1980, p. 311.
- [9] WONG, Y. H., THOMAS, R. L. and HAWKINS, G. F. — *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 538 (1978).
- [10] 4th International Topical Meeting on Photoacoustic, Thermal and Related Sciences, Canada, August 1985 (Technical Digest).
- [11] ROSENCWAIG, A. — *Science*, **218**, 223 (1982).
- [12] ROUSSET, G., BERTRAND, L. and CIELO, P. — *J. Appl. Phys.*, **57**, 4396 (1985).
- [13] OPSAL, J., ROSENCWAIG, A. and WILLENBORG, D. L. — *Appl. Opt.*, **22**, 3169 (1983).
- [14] SMITH, W. L., ROSENCWAIG, A. and WILLENBORG, D. L. — *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 584 (1985).
- [15] GILCHRIST, J. R., IMHOF, R. E., THORNLEY, F. R., BIRCH, D. J. S. and STRIVENS, T. A., ref. [10], TuD7.
- [16] GRICE, K. R., INGLEHART, L. J., FAVRO, L. D., KUO, P. K. and THOMAS, R. L. — *J. Appl. Phys.*, **54**, 6245 (1983).