

Introdução à Tecnologia LIGA

Luiz Otávio Saraiva Ferreira - lotavio@lnls.br

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron - LNLS

Rua Giuseppe Máximo Scolfaro, 10000 - Bairro Guará

13083-970 Campinas - SP

Tel: (019) 287-4520

Fax: (019) 287-4632

Introdução

No início dos anos 60, em paralelo com o surgimento dos Circuitos Integrados (CIs), que são a base da tecnologia eletrônica que ainda está causando profundas transformações no nosso modo de vida, surgiram os primeiros dispositivos micromecânicos, feitos com a mesma tecnologia utilizada para fazer os CIs. Nathanson, da Westinghouse, fez o transistor de porta ressonante, constituído de uma haste em balanço de $240\mu\text{m}$ de comprimento e $4\mu\text{m}$ de largura, suspensa $10\mu\text{m}$ acima da porta de um transistor MOS (Figura 1). Esse dispositivo era um filtro eletromecânico ($Q \approx 100$), e foram construídos exemplares com frequências de ressonância entre 1 e 50kHz.

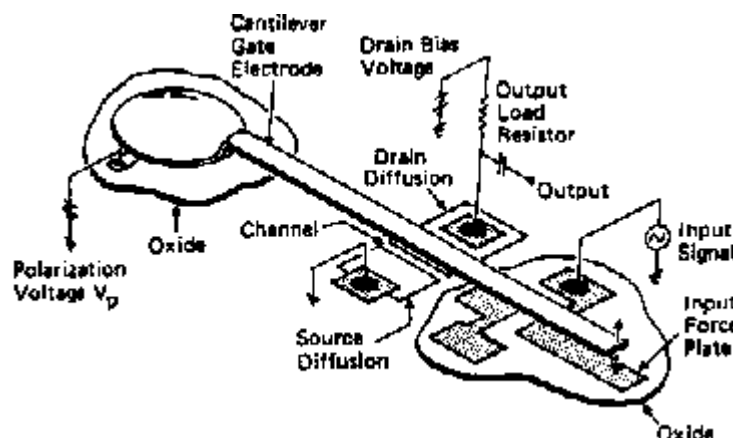


Figura 1 - As primeiras experiências com hastes vibrantes micromecânicas foram feitas na Westinghouse, em 1965, conforme o desenho acima. Um sinal elétrico de entrada faz a haste metálica vibrar, e quando o sinal de excitação contém harmônicas na frequência de ressonância da haste a amplitude da oscilação mecânica é suficiente para induzir um sinal de saída na porta do transistor MOS, que fica sob a haste.

A possibilidade de se construir juntos, no mesmo substrato de silício, circuitos microeletrônicos e estruturas micromecânicas tais como orifícios, membranas e hastes em balanço, produziu a Micromecânica em Substrato (Bulk Silicon Micromechanics), cujos frutos mais populares são as cabeças para impressoras a jato-de-tinta (Figura 2), que são uma combinação de orifícios, canais e cavidades. Outros dispositivos comercialmente bem-sucedidos são os sensores integrados de pressão (Figura 3) e alguns modelos de acelerômetros integrados (Figura 4), respectivamente usados em sistemas de injeção eletrônica de combustível em automóveis e nos "air-bags".

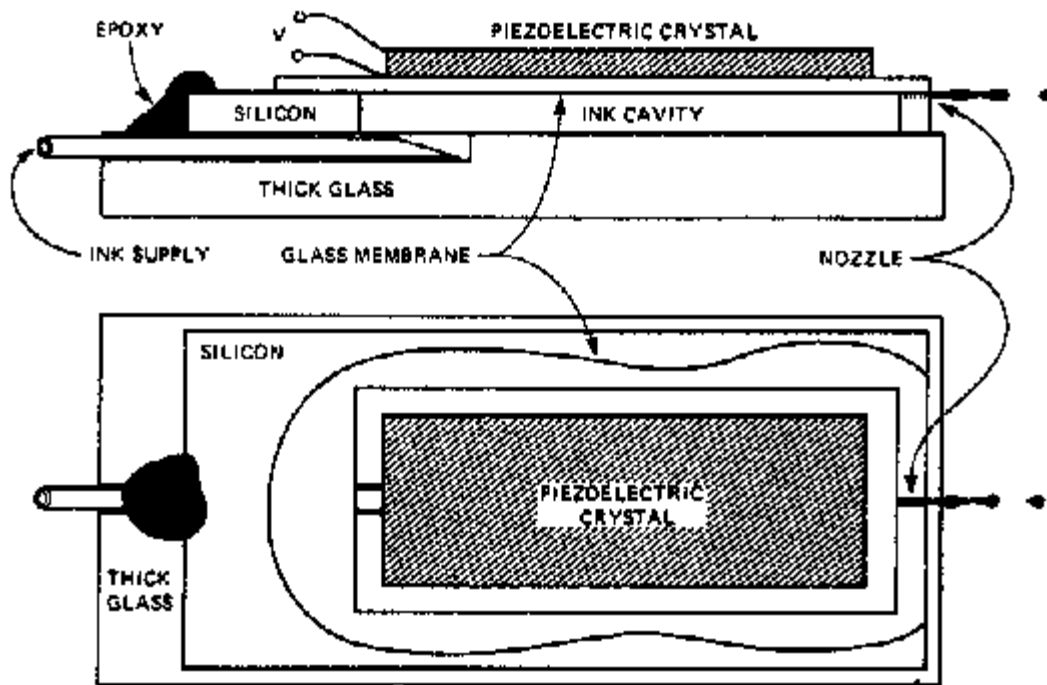


Figura 2 - Concepção de uma cabeça de impressora a jato-de-tinta. Vê-se duas placas de vidro, uma espessa e uma delgada, soldadas anodicamente em uma bolacha de silício; um canal de suprimento de tinta, e uma cerâmica piezzo elétrica fixada na placa de vidro delgada com resina epoxi [5].

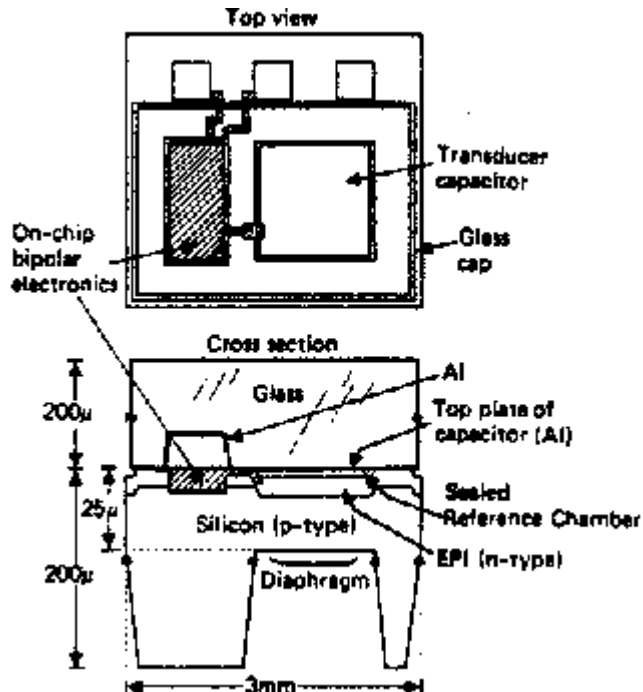


Figura 3 - Sandler e outros, de Stanford, demonstraram um transdutor de pressão capacitivo com circuitos de interface integrados no mesmo substrato de silício. Esse projeto visava a construção de um transdutor de pressão implantável para uso em biomédicas. Uma placa de vidro provida de rebaixos é soldada ao silício, selando o circuito eletrônico e contendo um dos eletrodos do capacitor [5].

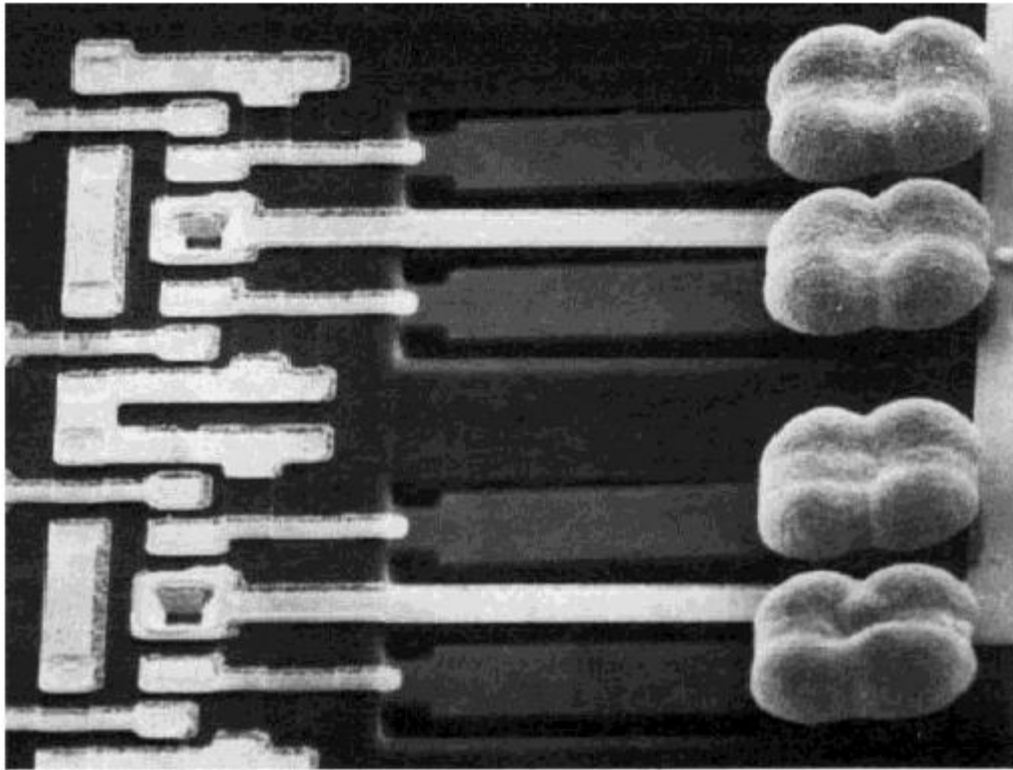


Figura 4 - O acelerômetro capacitivo integrado é constituído de a) uma haste em balanço acoplada a um circuito de detecção MOS. A capacitância das hastes é, tipicamente, de 3pF , e faz parte de um circuito divisor de tensão capacitivo b) que produz variações de tensão em resposta a variações de capacitância, excitando o transistor de detecção [5].

Outros dispositivos típicos dessa tecnologia (anos 70) são o cromatógrafo de gás de 2" de diâmetro (Figura 5), cuja coluna capilar mede 1,5 metros de comprimento e foi corroída em uma bolacha de silício de 2" de diâmetro; um minirefrigerador (Figura 6) utilizado para refrigerar detectores de infravermelho; acopladores para fibras ópticas (Figura 7); e defletores de feixes de luz (Figura 8).

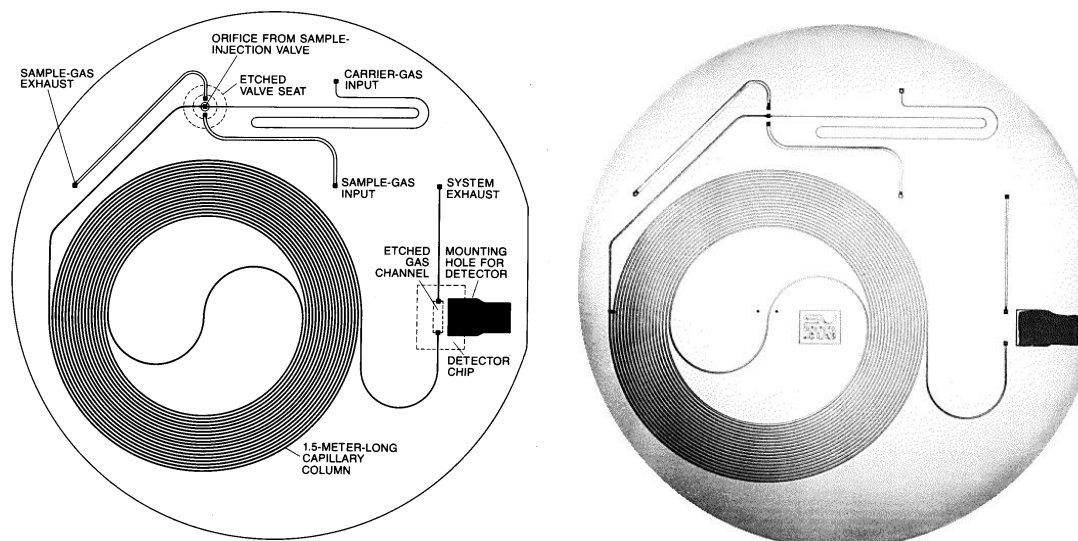


Figura 5 - Este cromatógrafo de gás de 50mm de diâmetro foi feito em Stanford, no início dos anos 80. A separação de gases é baseada nas diferenças de solubilidade dos vários gases no líquido que reveste a coluna capilar. Um gás de arraste inerte flui continuamente na coluna capilar. Quando a válvula de injeção é aberta, um pulso do gás a ser analisado é introduzido na coluna e arrastado pelo gás de arraste. Na medida que a amostra flui pela coluna, seus gases componentes são sucessivamente absorvidos e adsorvidos no revestimento líquido da coluna. Cada gás é identificado pelo seu tempo de retenção na coluna. Quando os gases chegam ao final da coluna eles passam por um orifício até um canal na outra face da bolacha de silício, onde há um detector de condutividade térmica. Os gases da amostra têm condutividade térmica menor que a do gás de arraste (He) e produzem picos de tensão na saída do detector. O volume de cada gás é determinado pela área sob o pico que ele gera [5].

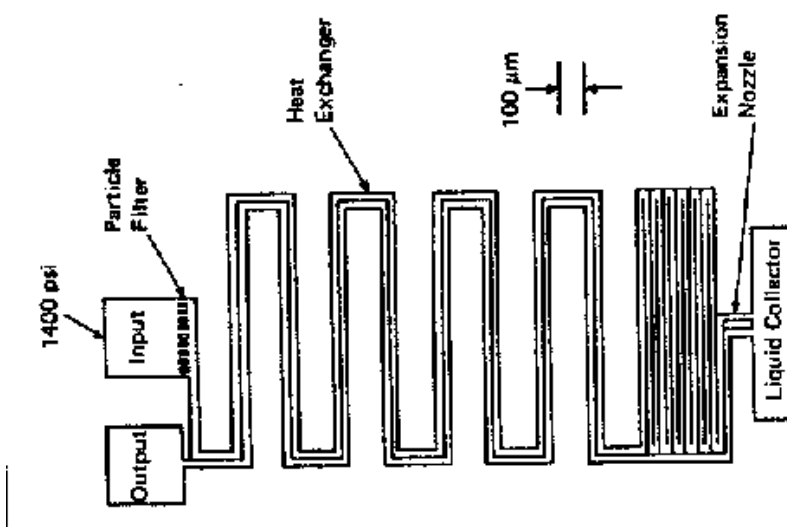


Figura 6 - Refrigeradores criogênicos foram fabricados a partir de canais em substratos de silício. Na concepção da figura, N₂ a alta pressão é injetado e se expande rapidamente na coluna coletora, absorvendo o calor dos arredores. Uma placa de vidro soldada por solda anódica sela os canais de silício [5].

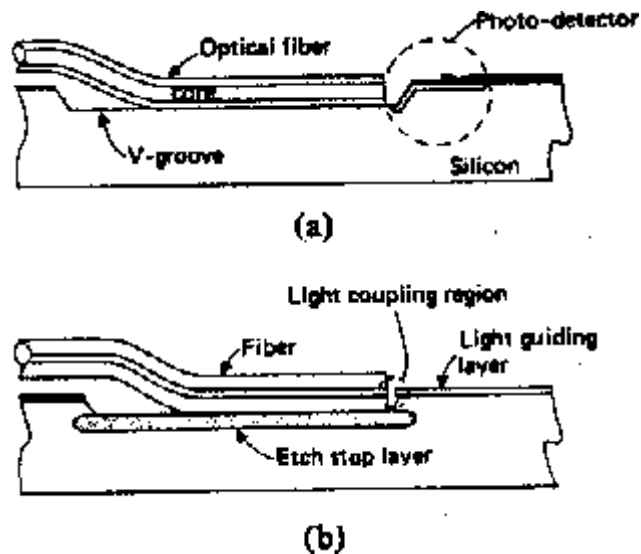


Figura 7 - Dois exemplos do emprego de silício para acoplamento de fibras ópticas: a) Acoplamento uma fibra com um fotodiodo detector usando-se um canal em V para alinhamento preciso. b) Acoplamento de uma fibra óptica a uma guia de ondas ópticas de filme fino, onde uma camada enterrada de fim de corrosão é usada para obter-se melhor precisão no alinhamento vertical [5].

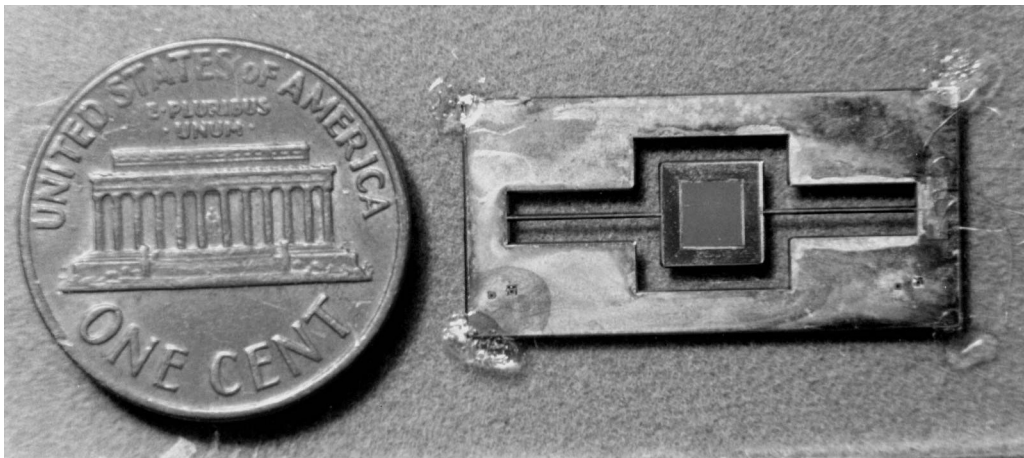


Figura 8 - Defletor de feixes de luz acionado eletromagneticamente. É constituído de uma moldura fixa (estator) à qual se liga um rotor através de barras de torção. Sobre o rotor estão uma bobina planar e um espelho. A bobina é alimentada por trilhas que passam sobre uma das barras de torção. Em presença de um campo magnético externo, há a produção de um torque no rotor ao se passar uma corrente elétrica pela bobina, e o espelho é assim girado em torno do eixo das barras de torção [6].

As principais limitações dessa tecnologia são:

1. É possível fazer-se apenas cavidades retangulares.
2. Os processos de corrosão anisotrópica de silício utilizados são de difícil compatibilidade com os processos de fabricação de circuitos integrados.

Duas novas tecnologias de microfabricação, que objetivavam a superação desses obstáculos, foram criadas no início dos anos 80:

Na Universidade da Califórnia em Berkeley foi criada uma tecnologia que utiliza apenas os mesmos processos de fabricação utilizados em circuitos integrados [1,2,7]. Possibilitou a construção de microturbinas, motores eletrostáticos e ultrasônicos, juntas mecânicas, etc. (Figura 9), mas a espessura das microestruturas era limitada a $5\mu\text{m}$, e os materiais tinham necessariamente que ser os mesmos utilizados em microeletrônica (Si, SiO_2 , Si_3N_4 , polisilício, Al, Cr, etc.).

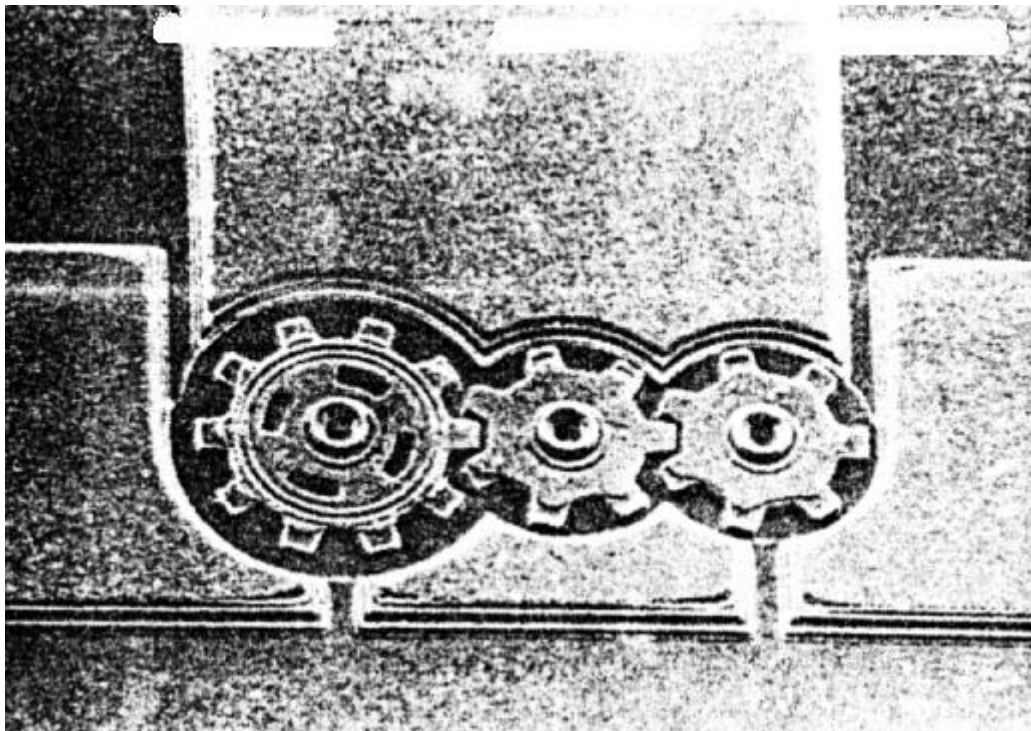


Figura 9 - Um trem de engrenagens parcialmente solto do substrato (escala de $100\mu\text{m}$ por traço) [8].

No Forschungszentrum Karlsruhe, Alemanha, foi criada uma tecnologia em que as partes mecânicas são feitas em pequenos moldes produzidos por litografia profunda por raios-x (Figura 10). Essa tecnologia possibilita a fabricação de microestruturas de elevada razão-de-aspecto (por exemplo, uma parede de $200\mu\text{m}$ de altura por apenas $2\mu\text{m}$ de largura) em materiais tão diversos quanto metais, polímeros ou cerâmicas. Essas microestruturas podem ser adicionadas a circuitos integrados, formando sistemas integrados. Por ser essa tecnologia formada por etapas sucessivas de Litografia, Eletroformação e Moldagem, foi batizada com as iniciais em alemão dessas operações (LIGA).

A Tecnologia LIGA

A tecnologia LIGA foi originalmente concebida com base na litografia profunda por raios-x (LIGA-RX) [1,2,3,8,...,12], mas recentemente, graças a avanços na área de materiais, viabilizou-se uma variante tecnológica baseada em litografia profunda por ultravioleta (LIGA-UV) [17].

A etapa primária da fabricação de uma microestrutura é a litografia profunda [2,3,4,13,...,16], que pode ser tanto por raios-x quanto por ultravioleta, mas ambas obedecem ao esquema mostrado na figura abaixo (Figura

10), onde usa-se máscaras litográficas convencionais no caso UV e máscaras especiais no caso RX [2,3,4,18]. O leitor poderá ver uma detalhada descrição do processo de litografia profunda por raios-x em PMMA no texto de Aida El-Kholi, neste mesmo livro.

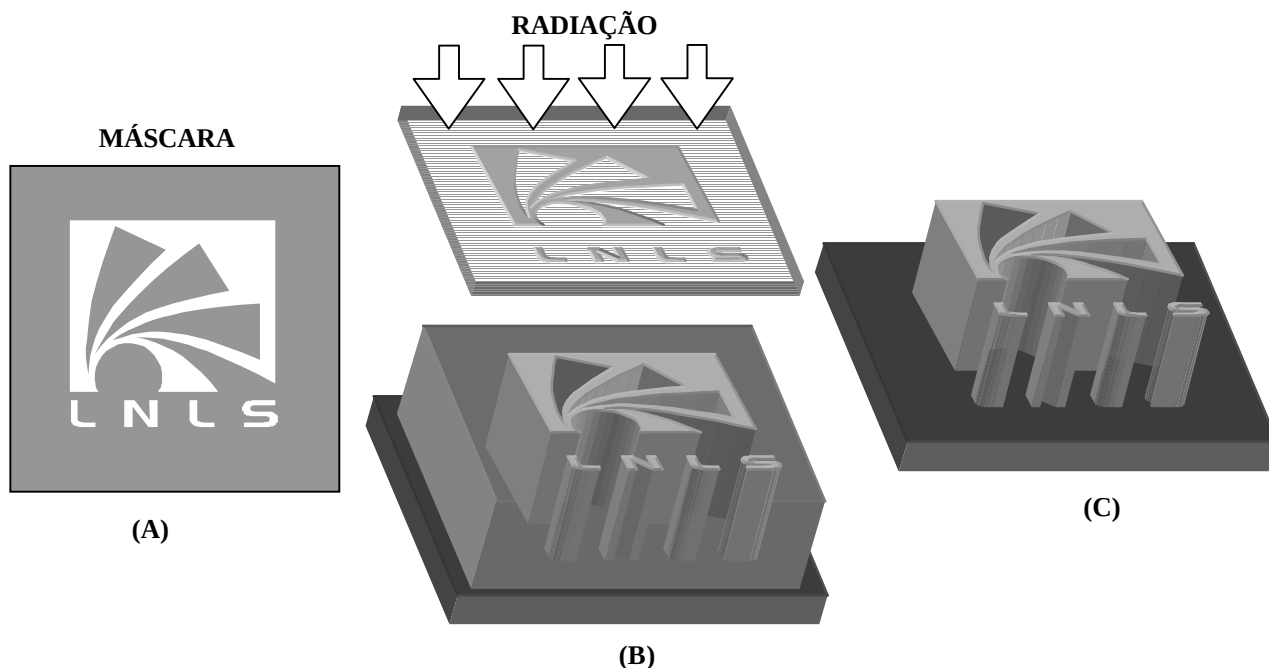


Figura 10 - Etapas da litografia profunda: A) Desenho da máscara litográfica, onde as regiões claras são transparentes à radiação e as regiões escuras são opacas à radiação, B) Projeção da imagem da microestrutura numa resina fotosensível (fotorresiste), tornando insolúvel as regiões atingidas pela radiação, e C) Revelação da resina, removendo-se as regiões não-atingidas pela luz e obtendo-se a microestrutura de fotorresiste.

Caso se deseje uma microestrutura de fotorresiste, já se tem o produto final. Como exemplo deste caso podemos citar a fabricação de engrenagens plásticas para relógios de pulso, que estão sendo feitas pelo processo LIGA-UV para a empresa Swatch.

Caso se deseje produzir microestruturas de metal deve-se usar as microestruturas de resiste produzidas por litografia ou microestruturas de plástico produzidas por moldagem como fôrmas para a eletroformação [2,19] das microestruturas metálicas (Figura 11).

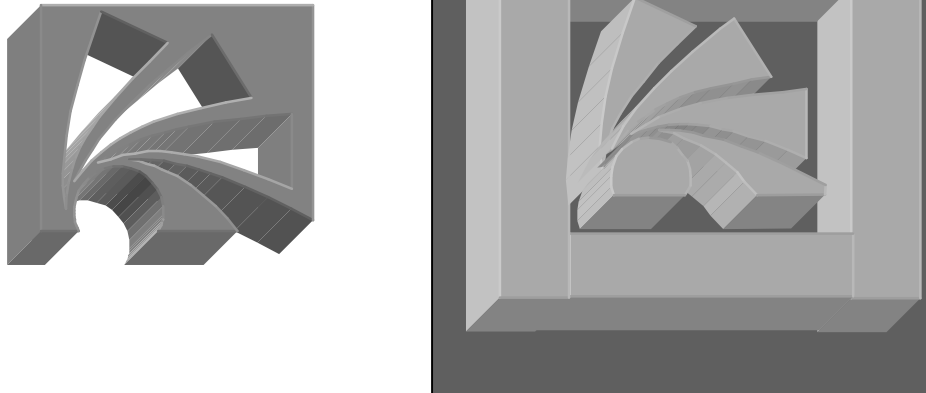


Figura 11 - Microestruturas metálicas podem ser produzidas a partir de formas produzidas por litografia profunda, empregando-se o processo de eletroformação. Usualmente emprega-se Au, Ni, Cu e Cr no processo de eletroformação. Dado um molde como ilustrado à esquerda, produzem-se as microestruturas metálicas da ilustração da direita..

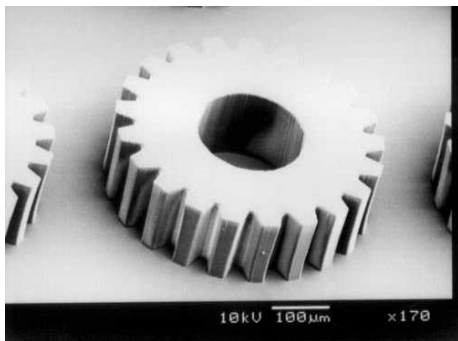
Caso se deseje produzir microestruturas cerâmicas, pode-se usar as microestruturas produzidas por litografia como fôrmas nas quais se coloca lama cerâmica e procede-se à queima em forno, onde o molde é perdido [11,12].

O processo de eletroformação é utilizado também para produção de moldes para termomoldagem ou para injeção de plástico [2,21], casos em que as microestruturas de resiste são replicadas em plástico. Essas estruturas de plástico, por sua vez, podem ser utilizadas para a produção de partes metálicas ou de cerâmica em grande escala e a baixo custo, substituindo o fotorresiste nos respectivos processos. Podem ainda as microestruturas de plástico ser os produtos finais, merecendo especial destaque a produção de microreatores químicos descartáveis de plástico para uso em laboratórios de análises clínicas [2,21,22]. Os plásticos mais utilizados são o PMMA, PVDF, POM e PA.

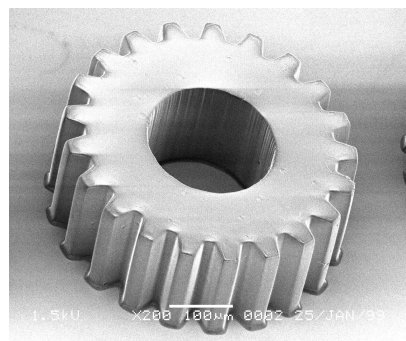
Exemplos de Microdispositivos LIGA

Diversas etapas da tecnologia LIGA já foram desenvolvidas no LNLS, podendo-se apresentar exemplos de dispositivos de interesse para as áreas de química, bioquímica, biomédicas e mecânica.

O exemplo mais intuitivo é a microengrenagem apresentada a seguir (Figura 14), produzida tanto em fotorresiste SU-8 quanto em Níquel. Podemos comparar o mesmo projeto de engrenagem microfabricado por LIGA-UV e por LIGA-RX, notando-se a superior verticalidade das paredes do processo LIGA-RX.



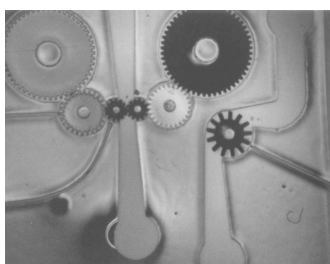
A)



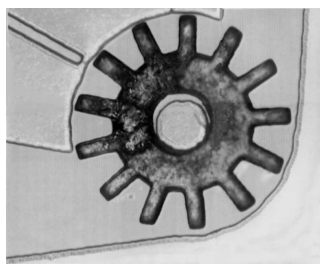
B)

Figura 12 - Microengrenagem de 470µm de diâmetro e 125µm de espessura produzida por litografia profunda em fotorresiste SU-8. a) Caso em que se utilizou litografia UV. b) Caso em que se utilizou litografia RX. Note-se a superior verticalidade das paredes obtida com RX.

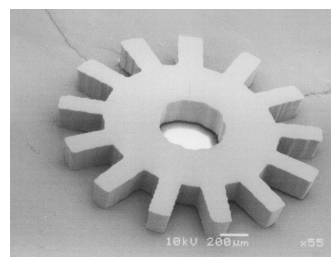
Pode-se também fazer canais e eixos verticais de fotorresiste, nos quais podem ser montadas microengrenagens e microturbinas, formando-se micromáquinas, como mostrado na figura abaixo (Figura 13).



A)



B)



C)

Figura 13 - A) Micromotor hidráulico, e microfluxômetro. As engrenagens menores do micromotor, de 1mm de diâmetro, são giradas pelo fluir de um líquido ou gás e o movimento é transmitido às engrenagens maiores, de 2 e 4 mm de diâmetro, respectivamente B) Detalhe do microfluxômetro com turbina de 2mm de diâmetro. C) Fotografia de uma turbina. Em ambos os casos os canais e eixos foram feitos em fotorresiste SU-8 sobre substrato de silício e as partes móveis foram feitas à parte e montadas nos eixos. Note-se os canais para fibras ópticas para medição da velocidade de rotação das engrenagens e da turbina.

Na maioria dos microssistemas de análises químicas e bioquímicas precisa-se realizar as operações de filtragem e mistura da amostra com um solvente, o que pode ser feito em filtros e misturadores constituídos apenas de canais e orifícios, como mostrado na figura abaixo (Figura 14).

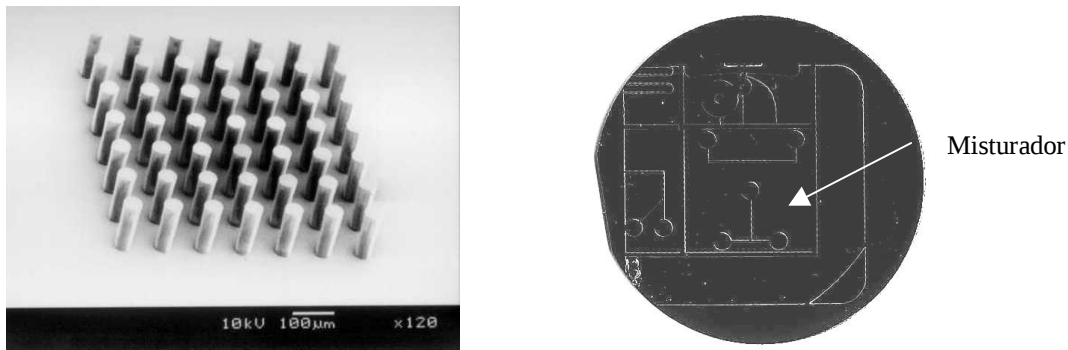


Figura 14 - a) Elementos filtrantes para líquidos. As partículas em suspensão no líquido ficam retidas na matriz de postes. b) Misturador para líquidos. Há duas entradas e uma saída, e na junção dos canais de entrada há elementos geradores de turbulência (turbuladores) para acelerar o processo de mistura. Ambos os dispositivos foram feitos no LNLS com litografia profunda UV em fotorresiste SU-8.

Dispositivos mais complexos, feitos pela combinação de partes de polímero e filmes finos, já estão em produção comercial, merecendo citar-se as bombas para líquidos e as válvulas para líquidos e gases [23,...,25]. O leitor poderá ver a detalhada descrição de um atuador linear LIGA no texto de Manfred Kohl, neste mesmo livro. Complexos dispositivos metálicos, tais como acelerômetros, filtros para líquidos e conectores elétricos, e dispositivos ópticos tais como redes de difração, guias de ondas, lentes e chaves, podem ser vistos na referência [12].

Conclusão

Foi apresentada ao (à) leitor (a) uma visão geral da tecnologia LIGA, preparando-o (a) tanto para o entendimento dos demais seminários sobre o assunto quanto para a leitura da bibliografia apresentada, onde uma descrição detalhada de cada tópico pode ser encontrada.

Referências

1. L. O. F Ferreira, "Micromecânica Básica", Notas de aula-1, V Oficina de Microeletrônica, UNICAMP, 1996.
2. Mark J. Madou, "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press, 1997.
3. P. Rai-Choudhury, editor, "Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication; Vol. 1: Microlithography", 1997.
4. P. Rai-Choudhury, editor, "Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication", Vol. 2: Micromachining and Microfabrication", 1997.
5. Petersen, K. E., "Silicon as a mechanical material," *Proc. of the IEEE*, (USA), Vol. 70, No. 5, pp. 420-457, May 1982.
6. Ferreira, L. O. S, and Moehlecke, S., "A silicon micromechanical galvanometric scanner," *Sensors and Actuators - A*, Vol. 73, No. 3, pp. 252-260, March, 1999.
7. Mehregany, M., Gabriel, K. J., "Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms," *IEEE Trans. On Electron Dev.*, (USA), Vol. 35, No. 6, pp. 719-723, June 1988.
8. Frazier, A. B.; Warrington, R. O.; and Friedrich, C., "The Miniaturization Technologies: Past, Present, and Future," *IEEE Trans. on Industr. Electron.*, Vol.42, No. 5, pp. 423-430, october, 1995.
9. Ehrfeld, W.; Lehr, H., "LIGA Method: Deep x-ray Lithography for the Production of Three-Dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics," (Preprint) *Radiation Physics*.

10. Barcher, W.; Menz, W.; and Mohr, J., "The LIGA Technique and Its Potential for Microsystems - A Survey," *IEEE Trans. on Industr. Electron.*, (USA), Vol. 42, No. 5, pp. 431-441, october, 1995.
11. Ugarte, D. "Deep X-ray Lithography for Microfabrication", *Proc. of the VII LNLS Users Workshop*, Campinas, SP, Brazil, 15-17 Dec. 1993.
12. Ehrfeld, W. and Münchmeyer, D., "Three-dimensional microfabrication using synchrotron radiation", *Nuclear Instrums. and Methods in Phys. Res.*, Neederlands, Vol. A 303, pp. 523-531, 1991.
13. Vladimirsky, Y.; Morris, K.; Klopff, J. M.; Vladimirsky, O.; and Saile, V., "X-ray Micro-Lithography Exposure System for High Aspect Ratio Micromachining", *Proc. of SPIE*, (USA), Vol. 2640, pp. 36-44, 1995.
14. Dahlbacka, G. H; Pearce, J.; and Younger, F., "Beamlines for thin and thick resist X-ray lithography", *Nuclear Instrums. and Methods in Phys. Res.*, Neederlands, Vol. A 319, pp. 359-365, 1992.
15. Mohr, J.; Ehrfeld, W.; Münchmeyer, D., "Requirements on resist layers in deep-etch synchrotron radiation lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 6, No. 6, pp. 2264-2267, Nov/Dec 1988.
16. Feiertag, G., Ehrfeld, W., Lehr, H., Schmidt, A. and Schmidt, M., "Calculation and experimental determination of the structure transfer accuracy in deep x-ray lithography", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 7, pp. 323-331, 1997.
17. Despont, M., Lorenz, H., Fahrni, N., Brugger, J., Renaud, P., and Vettiger, P., "High-Aspect-Ratio, Ultrathick, Negative-Tone Near-UV Photoresist for MEMS Applications", *Proc. Of the 10th MEMS Workshop*, Nagoya, Japan, pp. 6412-6416, Jan. 26-30, 1977.
18. Vladimirsky, Y., Vladimirsky, O., Saile, V., Morris, K. H., and Klopff, J. M., "Transfer mask for high aspect ratio micro-lithography", *Proc. of the SPIE*, Vol. 2437, pp. 391-396, 1995.
19. Maner, W., and Ehrfeld, W., "Electroforming Techniques in the LIGA Process for the Production of Microdevices," *Materials & Manufacturing Processes*, 4 (4), 527-537 (1988).
20. Both, A., Bacher, A., Hecke, M., Müller, K. D., Ruprecht, R., Strohmman, M., "Molding Process with High Alignment Precision for the LIGA Technology, *Proc. of the Micro Electro Mechanical Systems – MEMS'95*, pp. 186-190, 1995.
21. Boone, T. D., Hooper, H. H. and Soane, D. S., "Integrated Chemical Analysis on Plastic Microfluidic Devices", *Proc. of the Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, South Carolina, USA, pp. 87-92, June 8-11, 1998.
22. Elderstigm H. and Laarsson, O., "Polymeric MST – high precision at low cost", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 7, pp. 89-92, 1997.
23. Gebhard, U., Hein, H., Just, E. and Ruther, P., "Combination of a Fluidic Micro-Oscillator and a Micro-Actuator in LIGA-Technique for Medical Application", *1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, June 16-19, 1997, pp. 761-764.
24. Bustgens, B., Bacher, W., Menz, W. and Schomburg, W. K., "Micropump Manufactured by Thermoplastic Molding", *Proc. of the Micro Electro Mechanical Systems – MEMS'94*, pp. 18-21, 1994.
25. Schomburg, W. K., Ahrens, R., Bacher, W., Engemann, S., Krehl, P. and Martin, J., "Long-Term Performance Analysis of Thermo-Pneumatic Micropump Actuators", *1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, June 16-19, 1997, pp. 365-368.