

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

6,50
(seis e cinco)
Hony

“Estudo de uma Micropinça para Manipulação de Material Celular”



Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Marcelo Ishikawa

Prof. Orientador: Ricardo Cury Ibrahim

**São Paulo
2002**

Agradecimentos

Ao professor Ricardo Cury Ibrahim por suas orientações na realização deste trabalho.

Aos meus pais e a minha irmã pelo apoio e motivação.

E aos meus amigos.

Índice

1.	Resumo	3
2.	Cronograma	4
3.	Introdução.....	6
4.	Introdução à Célula.....	8
4.1.	Como se Constituem as Células	8
4.2.	A Célula Animal.....	13
4.3.	O Núcleo	14
5.	Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)	18
5.1.	O Desenvolvimento de MEMS	19
5.2.	A Natureza da Tecnologia de MEMS	23
5.3.	O Futuro dos Dispositivos MEMS	24
6.	Microatuadores	29
6.1.	Estudo de uma Micropinça.....	30
6.2.	Princípios de Atuação.....	33
6.3.	Princípio Eletrostático (capacitivo):.....	36
7.	Atuação Comb Drive	42
7.1.	Estudo Analítico	45
7.1.1.	Atuação Eletrostática em Comb Drives	46
8.	Mecanismos Flexíveis	49
8.1.	Rígido x Flexível	49
8.2.	O Uso de Mecanismos Flexíveis	51
8.3.	Aplicação a MEMS	53

9.	Materiais para Microfabricação	56
9.1.	Silício como Material para MEMS	58
10.	Fabricação de Microestruturas.....	60
11.	Definição da Estrutura:	65
12.	Simulação em Elementos Finitos:	69
13.	Fabricação.....	74
13.1.	LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron	74
13.2.	LME – Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP	75
13.3.	Processos	76
14.	Resultados.....	79
15.	Conclusão	82

1. Resumo

O presente trabalho é dirigido a introduzir os diversos aspectos inerentes a fabricação de uma micropinça atuada por atuador capacitivo para a realização de manipulação de uma célula. O objetivo da manipulação da célula é permitir que se possa coletar material interno à célula de modo que um posterior processo faça as análises necessárias para seu estudo, o que não será abordado no presente trabalho.

Neste relatório constará uma visão geral dos fatores que interferem na produção e rendimento do microdispositivo analisado. Começa-se realizando uma breve introdução sobre os objetos de manipulação - as célula - discutindo depois aplicação e configurações dos Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) e especificamente sobre os atuadores. Aborda também as características dos materiais que são utilizados para a fabricação dos dispositivos, assim como, os processos de fabricação e a própria fabricação do dispositivo.

2. Cronograma

Sabendo que a realização de um bom trabalho consiste também em seu bom planejamento, fez-se um plano de estudo no qual aparece representada a seqüência de ações necessárias para a conclusão do estudo da micropinça para manipulação de células.

Tópico	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezenbro
Pesquisa sobre Sistemas Microeletromecânicos (MEMS).										
Estudo sobre fundamentos de mecanismos flexíveis.										
Estudo sobre micropinças (micronevertes).										
Definição da configuração da micropinça (dimensões).										
Simulação do funcionamento da micropinça usando o software ANSYS.										
Fabricação do dispositivo.										
Comparação e análise dos resultados experimentais.										

Figura 1 - Cronograma Físico

A seqüência do cronograma começa com a pesquisa bibliográfica e estudo dos fundamentos englobando a própria célula, os Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) e o mecanismo de atuação. Este estudo inicial permitirá entender a importância crescente da aplicação de MEMS, principalmente a assunto relacionados à área médica. O estudo dos fundamentos realiza-se principalmente

com consultas a artigos científicos, realizados pelos centros de pesquisa mais avançados na área, disponibilizados pela internet.

Realizando a pesquisa inicial, deverá ser feita uma análise profunda do mecanismo de funcionamento, assim como o mecanismo de atuação em estudo - capacitivo - de modo a possibilitar a determinação de seus parâmetros com auxílio da simulação em programa Ansys e posterior construção de forma que ao final do projeto possa haver uma análise crítica da eficiência de sua aplicação.

A análise crítica deverá considerar todos os fatores responsáveis pelo funcionamento da micropinça, desde o material empregado em sua fabricação, o processo de fabricação até a configuração da estrutura mecânica utilizada.

3. Introdução

Os sistemas micromecânicos encontram suas melhores aplicações em manipulação de micro-objetos que tipicamente apresentam dimensões tão pequenas quanto as ferramentas microfabricadas. O recente progresso nas técnicas de microfabricação provê condições para se manipular objetos em escala micrométrica.

O uso destes sistemas micromecânicos encontra portanto larga aplicação no campo da biologia, desde células com apenas algumas dezenas de micrômetros até estruturas biológicas maiores; principalmente quando se trata em manipular tais objetos individualmente.

Faz-se a manipulação de células, por exemplo, para se obter acesso ao material intracelular que servirá futuramente de análise para programas de estudos genéticos ou ainda para o próprio estudo da morfologia celular.

Alguns problemas específicos encontrados na manipulação de objetos biológicos referem-se a natureza dos objetos, que normalmente são frágeis e delicados, pois em casos que há aplicação excessiva de força pode-se deformar o objeto e eventualmente inutilizá-lo. Além disso, como se encontram em ambiente aquosos, uma vez que só são estáveis nestes ambientes, faz-se necessidade de realizar a manipulação em água, tornando imprescindível considerar as características do líquido como a viscosidade. Tais fatores impõem que algumas

restrições tornando parâmetros como a velocidade de manipulação fatores importantes, uma vez que se pode gerar fluxo em decorrência do movimento do micromecanismo e assim impedir o acesso ao objeto.

Para realizar o controle do movimento do mecanismo é comum beneficiar-se do uso do princípio eletrostático, mesmo que diversos outros princípios mais complexos tenham sido desenvolvidos.

4. Introdução à Célula

A parte da Biologia que estuda a célula recebe o nome de Citologia. O termo célula é na verdade, impróprio para caracterizá-la. Isso porque esse termo foi usado pela primeira vez por Robert Hooke, em 1665; quando ele observava em um microscópio rudimentar um fragmento de cortiça (tecido vegetal da casca de caules velhos). Neste fragmento, viu uma grande quantidade de pequeninos espaços vazios, que assim resolveu-se chamar de células. Hooke mostrou também que a estrutura celular não era restrita à cortiça, pois a encontrou em muitos outros vegetais.

Só muito tempo depois, que outros cientistas conseguiram, com equipamentos mais avançados, ver a célula viva e descobrir que ela não era um espaço vazio, mas um corpo cheio de conteúdo e com funções muito importantes. Mas mesmo assim, o nome CÉLULA nunca foi mudado...

4.1. Como se Constituem as Células

As células são unidades estruturais e funcionais dos organismos vivos, ou seja , todos os seres vivos são formados por células - compartimentos envolvidos por membrana, preenchidos com uma solução aquosa concentrada de substâncias

químicas. As formas mais simples de vida são células individualizadas que se propagam por cissiparidade.

Há muitos tipos diferentes de células, que variam enormemente em tamanho, forma e funções especializadas.

Os organismos superiores, como os humanos (acredita-se que contenha pelo menos 100 trilhões de células), são como cidades celulares, nas quais grupos de células performam tarefas especializadas e são ligadas por um intrincado sistema de comunicação.

Num punhado de solo ou numa xícara de água poderá haver dúzias de diferentes tipos de organismos unicelulares. E, em cada organismo multicelular seja ele o corpo humano ou a planta de milho, há dúzia ou centenas de diferentes tipos celulares, todos altamente especializados funcionando juntos na forma de tecidos e órgãos. E, não importa quanto grande e complexo seja o organismo, cada um dos seus tipos celulares retém alguma individualidade e independência.

Apesar das muitas diferenças visíveis, várias espécies de células são admiravelmente semelhantes nas suas características estruturais básicas.

As células são pequenas e complexas, o que torna difícil ver suas estruturas, descobrir sua composição molecular e, mais difícil ainda, encontrar funções para seus vários componentes.

Uma célula animal típica tem um diâmetro de 10 a 20 micrômetros, o que é aproximadamente 5 vezes menor que a menor partícula visível a olho nu. Somente quando microscópios ópticos de boa qualidade tornaram-se disponíveis, no início do século XIX pode-se descobrir que tecidos animais e vegetais são agregados de células individuais. Esta descoberta, proposta como a doutrina celular por SCHLEIDEN E SCHWANN, em 1838, marca o nascimento formal da biologia celular.

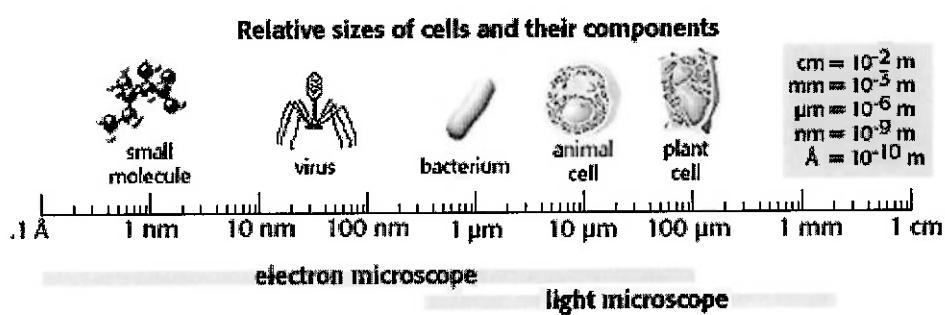


Figura 2 - Comparação de Tamanho de uma Célula

Diferencia-se as células basicamente entre as células vegetais e animais.

As células vegetais se distinguem das animais devidas às seguintes características:

- Parede celular,
- Conexões celulares (plasmodesmos),
- Vacúolos, Plastos e
- Reserva energética.

O citoplasma das células vegetais contém, além dos plastos e vacúolos, as mesmas organelas da célula animal. Aparentemente tanto o retículo endoplasmático liso quanto o granular e os ribossomos exercem funções semelhantes nas células animais e vegetais.

Logo abaixo da membrana plasmática observam-se sistemas de microtúbulos que correm paralelos à membrana. Provavelmente estão relacionados à formação da parede ou à manutenção da forma das células.

O aparelho de Golgi aparece na célula vegetal sob a forma de corpos dispersos pelo citoplasma, que, de um modo geral, são de tamanho menor do que os da célula animal, embora apresentem morfologia semelhante.

A célula vegetal está circundada por uma estrutura semi-rígida denominada parede celular, a qual confere proteção e apoio mecânico à célula, que se deforma a medida que a célula cresce e se diferencia.

Uma característica peculiar às células vegetais é a existência de conexões celulares (pontes citoplasmáticas) interligando células vizinhas. Tais cognições, chamadas de plasmodesmos, estão nos limites de resolução do microscópio óptico e ocorre em grande número (pelo menos de 1.000 a 10.000).

Os vacúolos são importantes estruturas citoplasmáticas características da célula vegetal. Nas plantas, o crescimento celular dá-se em grande parte devido ao crescimento dos vacúolos. O sistema de vacúolos pode atingir até 90% do volume total da célula.

Os plastos são organelas ligadas aos processos de fotossíntese. Há diversos tipos de plastos e sua classificação se faz de acordo com o material encontrado no seu interior. Os cloroplastos são os mais comuns e são verdes devido aos pigmentos de clorofila.

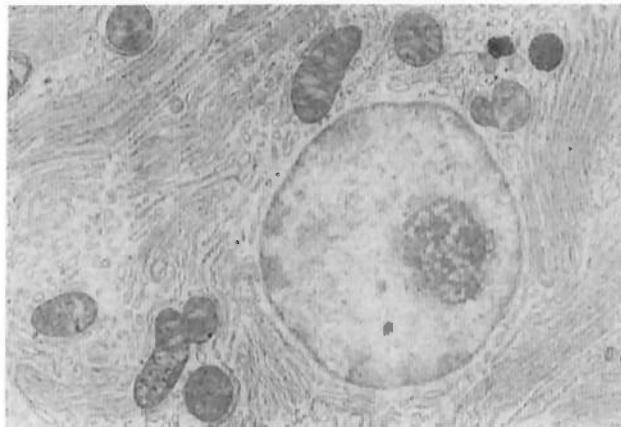


Figura 3 - Eletromicrografia de uma Célula Vegetal

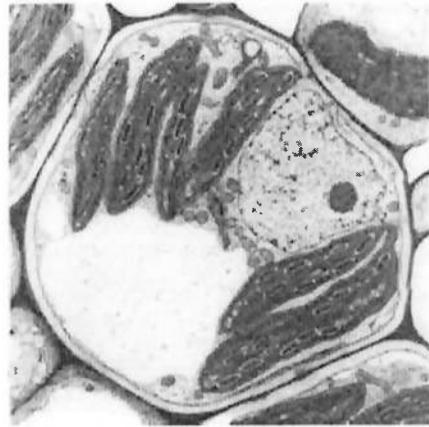


Figura 4 - Eletromicrografia de uma Célula Animal

4.2. A Célula Animal

O citoplasma é um componente gelatinoso e se localiza entre a membrana plasmática e o núcleo. O componente mais externo do citoplasma é a *membrana plasmática*, que o separa do ambiente extracelular. Em sua matriz está imersa uma série de estruturas denominadas de organelas e inclusões. São, pois componentes celulares permanentes: *retículo endoplasmático*, *mitocôndrias*, *complexo de Golgi*, *centríolos* e *lisossomos*. Já as inclusões são geralmente constituintes temporários de certas células e, normalmente, acúmulos de pigmentos, lipídeos, proteínas, glicídeos, etc.

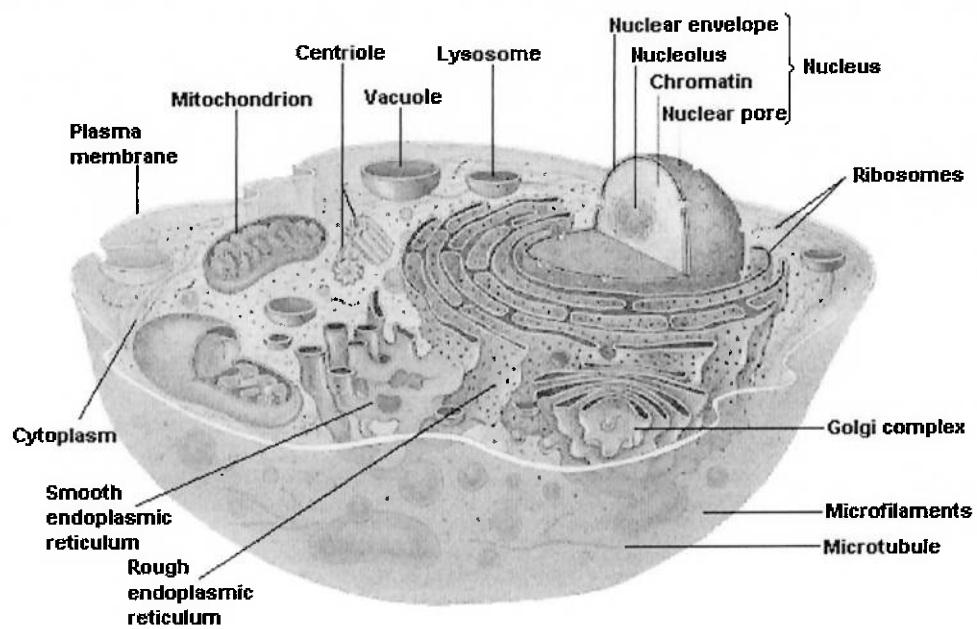


Figura 5 - Esquema de uma Célula Animal

4.3. O Núcleo

É no núcleo que encontramos o material genético, o DNA, que contém todas as informações necessárias para a formação das proteínas. Portanto o núcleo é de importância vital para a estrutura, fisiologia e hereditariedade, tanto da célula como do organismo. Tal importância podemos comprovar ao verificarmos que células anucleadas como os eritrócitos tem vida efêmera, de apenas alguns meses, e que células-ovo que tem seus núcleos removidos podem sofrer algumas divisões, porém não chegam a se diferenciar e morrem logo.

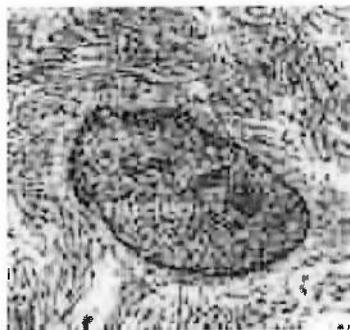


Figura 6 - Foto do Núcleo de Célula

Situa-se geralmente no centro da célula. Seu diâmetro em tecidos mamíferos, oscila em média entre 5 a 10 um. Cora-se em azul-escuro pelo método de hematoxilina-eosina. É constituído pelos seguintes componentes: envoltório nuclear, cromatina, nucléolo e nucleoplasma.

O núcleo quando observado na interfase da divisão celular apresenta uma membrana envoltória denominada de envoltório nuclear, o qual abriga um conjunto heterogêneo de fibrilas e de áreas densas, formadas pela cromatina (cromossomos num estado relativamente desespiralizados) e o nucléolo. A cromatina, que abriga o material genético (DNA), apresenta duas regiões, que podem ser caracterizadas pelo grau de espiralização: a **eucromatina** (desespiralização máxima) e a **heterocromatina** (regiões do cromossomo que estão espiralizadas). Vale ressaltar que alguns núcleos apresentam o cromossomo num estado heterocromático estável. Este é o caso de um corpúsculo que ocorre no núcleo de muitas células de

mamíferos do sexo feminino. Tal corpúsculo corresponde a um dos cromossomos X, e recebe o nome de corpúsculo de *Barr*.

O **envoltório nuclear** é um saco achatado que envolve o núcleo e é de muita importância para as interações que ocorrem entre o núcleo e o citoplasma. Ao microscópio eletrônico, tal estrutura parece ser muito semelhante ao retículo endoplasmático, o que é confirmado pelos resultados de estudos citoquímicos, os quais também revelaram uma semelhança enzimática e bioquímica com aquela organela. A superfície externa da membrana nuclear (voltada para o citoplasma) apresenta grânulos de ribinucleoproteínas ligadas a ela; tais grânulos são provavelmente ribossomos. Já a superfície interna desta membrana não apresenta ribossomos, no entanto encontramos, muitas vezes, a cromatina associada a esta superfície.

Poros nucleares foram observados ao longo da membrana nuclear. Tais estruturas, de forma poliédrica, surgem pela junção da superfície interna e externa do envoltório nuclear. Os poros medem cerca de 50 a 80 nanômetros de diâmetro, ocupando de 10 a 30 porcento da superfície da membrana. É através dos poros que ocorrem a passagem de substâncias entre o citoplasma e o interior do núcleo. Grânulos, provavelmente RNA, já foram vistos dentro dos poros, o que pode indicar que estariam de passagem em direção ao seu destino, o citoplasma.

Outra estrutura que encontramos no núcleo é o **nucléolo**, de forma esférico, formado principalmente por RNA ribossômico enovelado, mais proteínas, fosfolipídeos e algum DNA. Os nucléolos há muito foram associados com a produção de RNA.

5. Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)

Os Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) tornaram-se recentemente uma importante área da tecnologia, baseado principalmente no sucesso da indústria de microeletrônica nos últimos 50 anos. Os MEMS podem ser considerados como um sistema baseado na profusão de sistemas mecânicos e elétricos em proporções microscópicas. No entanto é precipitado dizer que os MEMS são simplesmente versões miniaturizadas de máquinas convencionais. Na verdade a sua tecnologia baseia-se na integração de componentes mecânicos (sensores e atuadores) e eletrônicos em um mesmo substrato de silício através de tecnologia de microfabricação. Enquanto os eletrônicos são fabricados através de processos utilizando circuitos integrados (CI) tais como CMOS, Bipolar ou BICMOS, os componentes micromecânicos são produzidos usando processos compatíveis com o “micromachining” (processos de microfabricação) que seletivamente retira material do substrato, normalmente feito de silício devido suas excelentes características, ou acrescenta novas camadas ao mesmo para formar estruturas mecânicas e microeletrônicas.

Como exemplo de tais dispositivos pode-se citar sensores de pressão, acelerômetros, giroscópios e dispositivos ópticos, para as mais diversas aplicações como biomedicina, aeroespacial, química, etc.

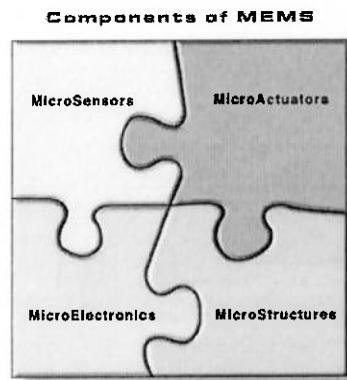


Figura 7 - Esquema de um Sistema Microeletromecânico

5.1. O Desenvolvimento de MEMS

Os MEMS são sistemas integrados compostos por sistemas microeletrônicos (CI), microatuadores e, em muitos casos, microsensores. A tecnologia de microeletrônica desenvolveu-se rapidamente a partir da década de 60 e atingiu sua maturidade na década de 70. Por sua vez a tecnologia de microfabricação e tecnologias da mecânica, sensores e microatuadores também se desenvolveram no mesmo período, praticamente em paralelo com a microeletrônica.

Em seu estágio inicial, o desenvolvimento dos processos de microfabriação esteve principalmente focado na implementação do “bulk micromachining” (microusinagem de volume) associados a transdutores de pressão, sendo então comum não se acreditar no sucesso da tecnologia, pois a associação da microeletrônica com estruturas micromecânicas não vinha apresentando resultados promissores.

Na década de 80, o primeiro sistema micromecânico com partes móveis foi fabricado utilizando tecnologia de microusinagem de superfície (microusinagem de superfície) e um ano depois teve sucesso a operação de um micromotor eletrostático. Devido a alta compatibilidade do processo de microfabricação microusinagem de superfíciee a microeletrônica, a integração entre os “micromachining” e a microeletrônica fez nascer os MEMS em anos seguintes.

Visando melhor definir Sistemas Microeletromecânicos, este trabalho irá considerar um MEMS típico o dispositivo que:

- Um dispositivo construído por processos de microfabricação e constituído por elementos de microeletrônica controlados por elementos microeletrônicos. Geralmente microsensores estão envolvidos no sistema de controle provendo sinais para os elementos microeletrônicos.

- Um dispositivo que seja fabricado utilizando processos de microfabricação e processo CI.

Por estes pontos entendesse que um transdutor de pressão não pode ser considerado um típico MEMS, mas como um sensor mecânico, em razão da falta de dispositivo microeletrônico para realização de controle sobre a estrutura micromecânica. Da mesma forma, um micro motor também não é um típico MEMS, mas uma parte de um MEMS - um microatuador.

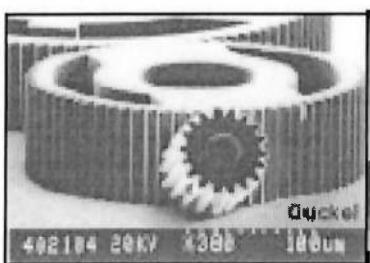


Figura 8 - Exemplo de uma Micro Engranagem

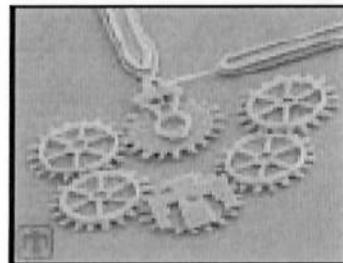


Figura 9 - Exemplo de alguns Microdispositivos

O desenvolvimento dos MEMS por quase uma década foi significativa: várias novas técnicas foram desenvolvidas, diversos dispositivos foram criados e fabricados sendo alguns comercializados, com produção de pesquisa em grande parte das universidades e institutos de pesquisa, gozando de apoio da indústria e de agência

do governo. Em menos de uma década o que então era um setor desacreditado, passou a ser considerada uma área muito popular, dinâmica e crível.

No entanto, o rápido aparecimento de novos MEMS fez com que as expectativas do meio acadêmico, assim como da sociedade em geral, ficasse muito alta. Alguns acreditavam que a maioria dos sistemas, como o robô, pudessem facilmente ser convertido para a versão micro e que também pudesse realizar funções similares.

De modo a introduzir uma aplicação prática para a atuação dos microatuadores, fez-se duas abordagens. A primeira delas consiste em tornar os microatuadores mais potentes e robustos, aplicação que vem obtendo alguns avanços como a utilização de “shape memory alloy (SMA)”, capaz de produzir muita força, ou o uso de micromotores eletrostáticos. A segunda abordagem consiste em procurar aplicações que não requerem muita força.

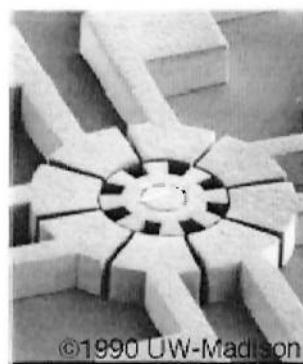


Figura 10 - Micromotor com Atuador Eletrostático

5.2. A Natureza da Tecnologia de MEMS

Os MEMS são a associação de duas modernas tecnologias, a microeletrônica e a microfabricação. Do ponto de vista tecnológico, observa-se que existe pontos em comum nestas duas tecnologias. A microeletrônica (CI) possui bases na tecnologia bidimensional de fabricação do silício, na verdade, a aplicação da fabricação em silício para a formação de estruturas mecânicas deu início à tecnologia da microfabricação.

Basicamente existem duas técnicas de microfabricação. A microusinagem de volume e a microusinagem de superfície. A microusinagem de volume é a técnica de microfabricação onde o volume do substrato é envolvido no processo, enquanto que a microusinagem de superfície somente há envolvimento de material da superfície do substrato. No entanto, quando se analisa as características de cada processo, observa-se que ambos possuem as mesmas virtudes: alta precisão e fabricação em larga escala.

Realizando os processos de microfabricação mais do que uma vez, pode-se produzir componentes muito complexos, porém acaba-se por restringir a flexibilidade do mesmo. Outra forma de se obter componentes tridimensionais muito complexos é através da montagem de pequenas e simples partes. Isto é possível a alta precisão

de manipulação e um adequado processo de supervisão simultânea, como por exemplo o uso de microscópio SEM, que apresenta excelente resolução.

É óbvio que não se pode comparar um MEMS com uma máquina convencional, seja em potência ou força. Quanto menor o tamanho, menor é a força e potência que este pode produzir. Em muitos casos, o problema decorre do alto atrito em microescala e da interferência da umidade e da sujeira.

Portanto sendo irreal considerar os MEMS uma versão miniaturizada de máquinas convencionais.

5.3. O Futuro dos Dispositivos MEMS

Para o futuro, entende-se que será preciso solucionar dois principais problemas: desenvolver novas tecnologias continuamente e aproveitar tais dispositivos para aplicação prática de acordo com a natureza do “micromachine”. No momento as atenções estão voltadas para o segundo problema.

Os MEMS tem a vantagem da alta precisão e baixo custo para produção em larga escala, porém com as limitações de força, potência e suscetibilidade ao ambiente de forma que os futuros MEMS deverão ser produzidos em subsistemas isolados devendo ser o acoplamento dos diversos dispositivos e o meio externo feito

através de vias elétricas, ópticas, magnéticas e outras formas de sinal sem contato mecânico; para aproveito em novas aplicações com vasto mercado.

Uma grande variedade de MEMS deverão ser produzidos no futuro de acordo com os critérios acima expostos, alguns são descritos abaixo.

a) MEMS para medição inercial:

Acelerômetros de silício foram fortemente desenvolvidos nas última década e são considerados os próximos microsensores de fabricação em larga escala após os sensores de pressão. O tipo mais atrativo de microacelerômetro é de fato um MEMS com sensores e atuadores (este para realizar a realimentação da massa sísmica) capacitivos.

Seu sucesso deve-se, em grande parte, ao fato de a medição da aceleração da massa sísmica não ser através de contato mecânico que apresenta grande perdas, assim como o sinal de saída que é elétrico. Outro fator para seu sucesso é o vasto campo de aplicação em sistemas de controle. Um exemplo de aplicação para o microacelerômetro é em controles de air bag de automóveis, com grande interesse da indústria.

Outro dispositivo para medição inercial é o giroscópio com operação similar ao acelerômetro muito utilizado para estabilização de aeronaves.

b) MEMS para processamento de sinal óptico e display:

Como uma unidade ROM que permite ter seus dados apagados com a utilização de luz ultravioleta, um MEMS pode ser fabricado de modo a comunicar-se com o ambiente externo através de luz ou sinais elétricos.

Um MEMS muito usado como descrito acima é um microespelho (DMD) como os estudados pela Texas Instrument, que podem ser aplicados em televisores domésticos, para apresentações ou palestras e em outdoor.

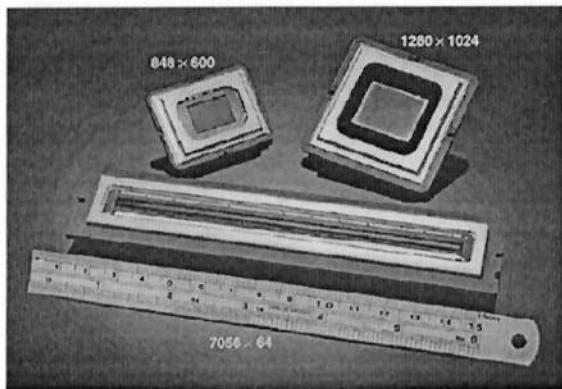


Figura 12 - Microespelhos para Projeção em Display Colorido

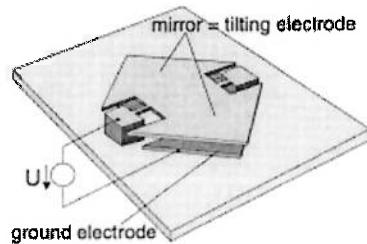


Figura 11 - Microespelho com Atuador Eletrostático

c) MEMS com sinais de saída magnéticos:

Um sinal magnético é um tipo de sinal de contato não-mecânico. No sistema microeletromecânico, a estrutura mecânica magnética encontra-se isolada do meio externo, com o qual se comunica por meio de sinais magnéticos.

Os principais componentes microeletromagnéticos são os microatuadores muito utilizados para impressão.

d) MEMS para controle de microposicionamento:

Microatuadores dificilmente podem fornecer potência suficiente para mover estruturas mecânicas, porém podem ser de auxílio para microposicionamento em ambientes apropriados, como o observado em hard disks que servem para armazenar grande quantidade de informação à maior densidade possível.

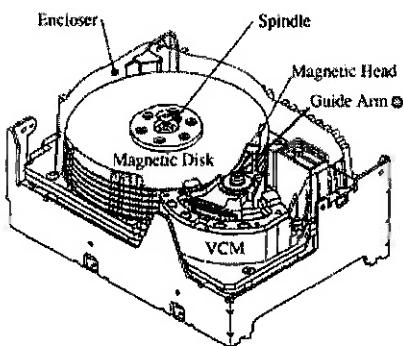


Figura 13 - Componentes de um Hard Disk

e) MEMS para análise de reação química e bioquímica:

Sistemas de análise química tem sido um dos objetivos para as aplicações de MEMS desde o começo das pesquisas, através do desenvolvimento de microválvulas e de gás chromatográfico em substrato de silício; porém ainda não apresentaram resultados concretos, apesar dos esforços de grandes centros de pesquisa como a Stanford University.

6. Microatuadores

Por mais de uma década, houve grande desenvolvimento dos microdispositivos de atuação - microatuadores – baseados em tecnologia já existente dos microsensores e fabricação de semicondutores.

Os primeiros dispositivos eram simples estruturas mecânicas atuadas eletrostaticamente para detecção de umidade através da análise de freqüência de ressonância. Na década de 80 houve desenvolvimento de dispositivos mais complexos como molas, manivelas, engrenagens e outras estruturas de modo a proporcionar microdinâmica rotacional ou a construção de MEMS mais complexas.

Primeiramente, é necessário ressaltar que a manipulação em microescala difere bastante da manipulação em macroescala. Comparado com o mundo macro, microatuadores permitiriam a construção de novas estruturas mecânicas. Volume e massa das estruturas diminuiriam drasticamente (fator ao cubo) em relação ao comprimento, mas com maior resistência ao choque. Um fator extremamente importante é o aumento da importância das forças de adesão, que tornam-se maiores que as forças iniciais, quando a escala diminui.

De todos os dispositivos aqueles que mais obtiveram progressos foram os relacionados à mecânica dos fluidos como as microválvulas e microbomba. São

justamente estes que conseguem mercado em grande escala. Porém, neste trabalho será analisado o projeto de uma micropinça para manipulação de células.

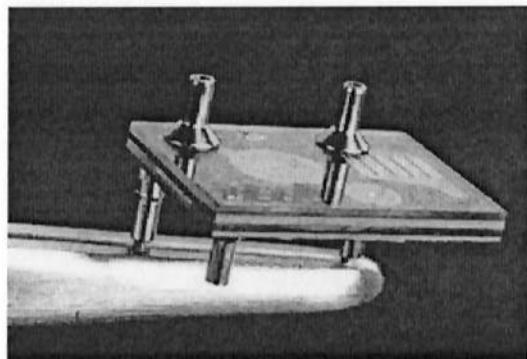


Figura 14 - Microbomba piezoeletrica

6.1. Estudo de uma Micropinça

O estudo de micropinça começa despertar interesse da comunidade pesquisadora e os dispositivos já fabricados tem sido, em sua maioria, baseados em estruturas mecânicas como as vigas atuadas eletrostaticamente ou em princípios da termodilatação.

Geralmente fabricados em silício mantinham-se presos ao substrato, fato que não permitia a manipulação tridimensional do dispositivo. Em alguns casos

conseguiu-se formular alternativas para o problema acima, porém a fragilidade dos componentes de silício impunham enorme restrição para a operação do dispositivo em três dimensões.

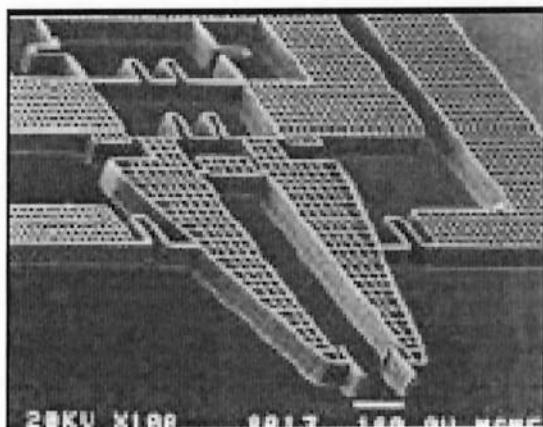


Figura 15 - Micropinça

Outros problemas comuns consistem na baixa força produzida pelas pinças, pequena abertura do mecanismo ou falta de liberdade para manipulação dos parâmetros. Além disso, diversos projetos encontravam dificuldades para operar as micropinças em ambientes líquidos em função da existência de tensões superficiais que limitavam a capacidade dos microatuadores.

À medida que se soluciona tais problemas, torna-se cada vez mais comum o uso destes microatuadores na manipulação e montagem de peças, na tentativa de

minimizar a evasividade da realização de biopsias ou mesmo na manipulação de pequenas partículas em ambientes extremos.

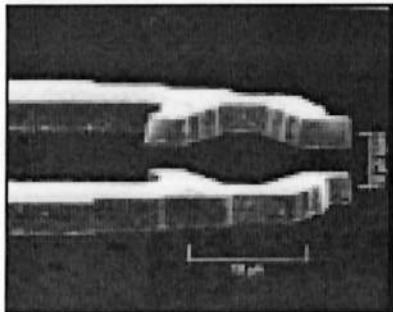


Figura 16 - Micropinça

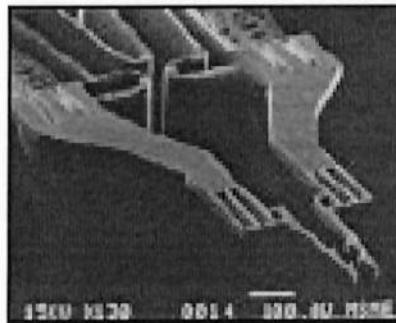


Figura 17 - Micropinça

Na manipulação de elementos biológicos (células), tem-se que enfrentar novas dificuldades. O fato de as células serem extremamente frágeis implica em nova abordagem e diferentes soluções mecânicas para realização da manipulação.

Em particular, a estrutura deverá:

- a) Trabalhar em solução líquida e ambiente esterilizado;
- b) Possuir tamanho reduzido, compatível com o tamanho do objeto de manipulação;
- c) Ter controle preciso sobre as forças de atuação sobre o objeto (delicado) para não danificá-lo .

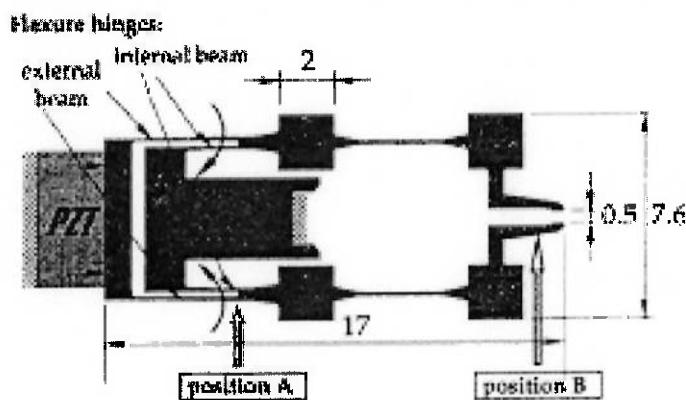


Figura 18 - Exemplo de Estrutura Usada para Manipulação de Elementos Biológicos

6.2. Princípios de Atuação

O fator de escala não interfere somente no desenho da estrutura mecânica do dispositivo, mas também na forma de atuação do dispositivo. A escolha correta do princípio de atuação deve levar em conta as dimensões estruturais do mecanismo, da tecnologia empregada na fabricação, no tempo de resposta, na força e torque produzidos em função da potência consumida.

Apesar de diversas tentativas, apenas alguns princípios de atuação conseguiram percorrer os caminhos da pesquisa nos laboratórios. Na tabela abaixo

podemos observar os principais princípios juntamente aos dispositivos que são empregados.

Princípio de atuação	Típicos MEMS
Eletrostático	Micromotores, micropinças, microespelhos, microscanner e microrelay.
Eletromagnético	Microrelay, microbombas e microválvulas.
Termomecânico	Microválvulas e micropinças.
Piezelétrico	Microbombas e microválvulas.
“Shape Memory Alloy”	Microválvula.
Pneumático	Microbombas e microválvulas.

Princípio Eletrostático:

Uma carga elétrica aplicada a um condutor cria uma atração em outro condutor carregado com carga elétrica contrária à primeira. Neste tipo de atuação é

necessário alta tensão para criar força suficiente (Maior tensão: 28-48V DC; Velocidade: 1-200 microsec; baixa potência consumida).

Princípio Eletromagnético:

Uma bobina ao energizar-se cria um campo magnético que induz uma força sobre o relê (Baixa voltagem: 5V DC; baixa resistência de contato).

Princípio Termomecânico:

Através da variação da temperatura ocorre expansão ou contração do material implicando em deslocamento das extremidades (Velocidade: 10s; Voltagem: 5V DC; alta consumo consumida).

Princípio Piezelétrico:

Materiais piezelétricos geram tensão quando excitados a uma corrente elétrica, permitindo a expansão ou contração do material controlando-se a tensão aplicada (Velocidade: 100ns a 1 μ s; requer material especial).

Para a análise da micropinça, o princípio de atuação que será estudado é o capacutivo.

A escolha foi feita com base em seu uso amplamente difundido usado em diversos microdispositivos, combinando versatilidade e uso de tecnologia simples. Além disto tal princípio não necessita de elementos adicionais como bobinas, ou mesmo materiais especiais como “shape memory alloy” ou cerâmicas piezelétricas. Ainda, este é menos suscetível a interferências externas como impureza do meio, uma vez que a força gerada é função da superfície e não do volume interno do mecanismo.

6.3. Princípio Eletrostático (capacitivo):

Esta seção irá descrever o princípio eletrostático e tem como finalidade fazer uma introdução sobre os efeitos capacitivos em microdispositivos, especialmente em microatuadores decorrente do acúmulo de carga em material condutor.

Qualquer tipo de matéria é formada por átomos. Estes são tão minúsculos que nenhum microscópio comum permite vê-los. Uma fileira de dez milhões de átomos não chega a medir um milímetro. Contudo, os átomos não são as menores partículas da matéria: eles próprios se compõem de partículas ainda menores, chamadas partículas subatômicas. No centro de todo átomo existe um conjunto formado por dois tipos de partículas: os *prótons* e os *nêutrons*. Esse conjunto de partículas é o núcleo do átomo. À volta deste núcleo, como se fossem satélites, giram os *elétrons*, partículas em movimento permanente. As trajetórias desses

elétrons se organizam em camadas sucessivas chamadas órbitas eletrônicas órbitas eletrônicas.

Os prótons do núcleo e os elétrons das órbitas se atraem entre si. A esta força de atração recíproca chamamos de *força elétrica*. É a força elétrica que mantém os elétrons girando à volta dos prótons do núcleo. Sem ela, os elétrons se perderiam no espaço e os átomos não existiriam.

Os elétrons, entretanto, repelem outros elétrons e os prótons repelem outros prótons. Dizemos, por isto, que as partículas com carga igual se repelem e as partículas com carga oposta se atraem. Convencionou-se chamar a carga dos prótons de positiva (+) e a carga dos elétrons de negativa (-).

Normalmente, cada átomo é *eletricamente neutro*, em outras palavras, tem quantidades iguais de carga negativa e positiva, ou seja, há tantos prótons em seu núcleo, quantos elétrons ao redor, no exterior. Os prótons estão fortemente ligados ao núcleo dos átomos. Somente os elétrons podem ser transferidos de um corpo para outro.

Podemos dizer que um corpo está eletrizado quando possui excesso ou falta de elétrons. Se há excesso de elétrons, o corpo está eletrizado negativamente; se há falta de elétrons, o corpo está eletrizado positivamente.

A quantidade de elétrons *em falta ou em excesso* caracteriza a *carga elétrica* Q do corpo, podendo ser positiva no primeiro caso e negativa no segundo. As forças entre cargas elétricas são forças de campo, isto é, forças de ação à distância, como as forças gravitacionais (com a diferença que as gravitacionais são sempre forças atrativas).

Em 1785 o cientista francês Charles Coulomb conseguiu estabelecer experimentalmente uma expressão matemática que nos permite calcular o valor da força entre dois pequenos corpos eletrizados. Coulomb verificou que o valor dessa força (seja de atração ou de repulsão) é tanto maior quanto maiores forem os valores das cargas nos corpos, e tanto menor quanto maior for à distância entre eles. Ou seja: a força com que duas cargas se atraem ou repelem é proporcional às cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. Assim, se a distância entre duas cargas é dobrada, a força de uma sobre a outra é reduzida a um quarto da força original.

Para medir as forças, Coulomb aperfeiçoou o método de detectar a força elétrica entre duas cargas por meio da torção de um fio. A partir dessa idéia criou um medidor de força extremamente sensível, denominado *balança de torção*.

De acordo com observações, pode-se exprimir o módulo da força elétrica entre duas cargas como:

$$F = \frac{k|q_1||q_2|}{r^2} \quad \text{onde } k \text{ é uma constante, denominada constante de Coulomb.}$$

A constante k tem um valor que depende da escolha de unidade, e em unidade SI tem o valor $k = 8,9875 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$.

A constante k também se escreve $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ onde a constante ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo.

A constante ϵ_0 tem valor $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$.

Quando estiverem presentes mais de duas cargas, a força resultante total sobre qualquer carga é igual à soma vetorial das forças devido às cargas individuais. E quando tais cargas acumulam-se por estruturas simétricas pode-se chegar a força resultante fazendo a interação de cada carga.

Um dispositivo muito usado para atuação em microdispositivos é feito através do efeito *capacitivo*, isto é , pelo capacitor. Este aparelho é destinado a armazenar cargas elétricas e é constituído por dois condutores separados por um isolante: os condutores são chamados armaduras (ou placas) do capacitor e o isolante é o dielétrico do capacitor. Costuma-se dar nome a esses aparelhos de acordo com a forma de suas armaduras. Assim temos o capacitor plano, capacitor cilíndrico,

capacitor esférico, etc. O dielétrico pode ser um isolante qualquer como o vidro, a parafina, o papel e muitas vezes o próprio ar.

A quantidade de carga armazenada na placa de um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial entre as placas. O quociente entre carga (Q) e diferença de potencial (U) é então uma constante para um determinado capacitor e recebe o nome de *capacitância* (C).

Quando o capacitor possui um isolante elétrico entre suas placas, sua capacidade aumenta. Este isolante dificulta a passagem das cargas de uma placa a outra, o que descarregaria o capacitor. Dessa forma, para uma mesma diferença de potencial, o capacitor pode armazenar uma quantidade maior de carga.

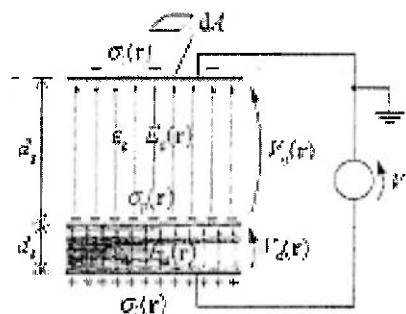


Figura 19 - Atuação Capacitiva

Porém devido os baixos valores de força gerados, normalmente, pela configuração usual - placas paralelas - do capacitor para microatuadores são um empecilho para a massificação do dispositivo, que necessita de altas voltagens. Uma solução comumente apresentada é fazer-se adotar uma configuração denominada "Comb Drive", ela permite obter valores necessário de força aplicáveis aos mais diversos usos mantendo-se menor diferença de potencial.

7. Atuação Comb Drive

Comb Drives são um dos dispositivos mais comumente encontrados em sistemas eletromecânicos (MEMS). Eles podem ser utilizados tanto em atuadores eletrostáticos como em sensores capacitivos.

O atuador comb drive apresenta característica linear. Consiste basicamente de duas estruturas similares a pentes com estruturas salientes denominadas interdigitações.

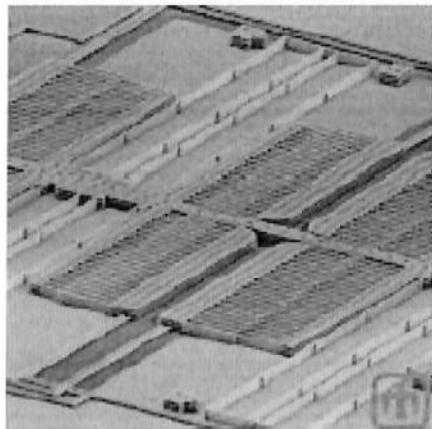


Figura 20 - Comb Drive

Os comb drives podem ser classificados inicialmente em duas categorias: o comb drive simétrico e o comb drive assimétrico. Geralmente, o comb dirve simétrico

é utilizado em situações em que são necessários pequenos movimentos, como os encontrados em sensores mecânicos, microbiologia, transmissão de potência mecânica ou atuação para longas distâncias.

Já os comb drives assimétricos encontram uso em situações que especificamente requerem grandes movimentos. Seu uso pode visto na fabricação de filtros mecânicos.

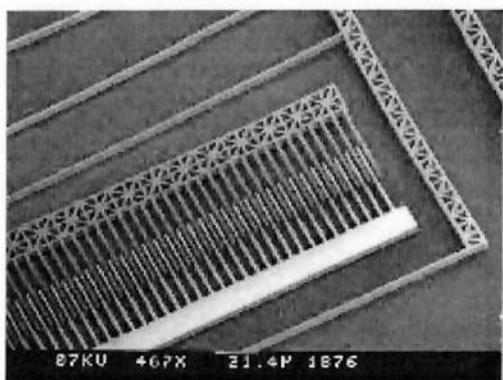


Figura 21 - Comb Drive Simétrico

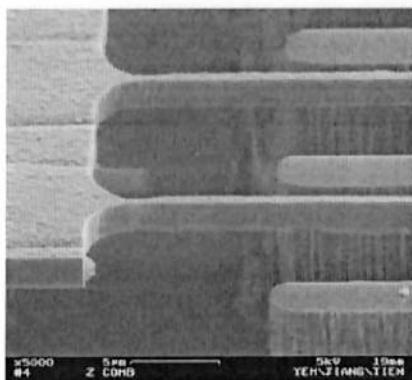


Figura 22 - Comb Drive Assimétrico

Diferentemente do comb drive simétrico, que possuem interdigitações de mesma espessura em ambos os pentes e espaçamentos entre duas interdigitações consecutivas iguais, o comb drive assimétrico possui interdigitações com espessuras menores, porém com comprimento maior do que os encontrados em quaisquer outros comb drives e espaçamentos entre as interdigitações consecutivas não iguais.

Na configuração abaixo temos o comb drive simétrico ou de deslocamento paralelo com detalhe para os espaçamentos simétricos entre as interdigitações.

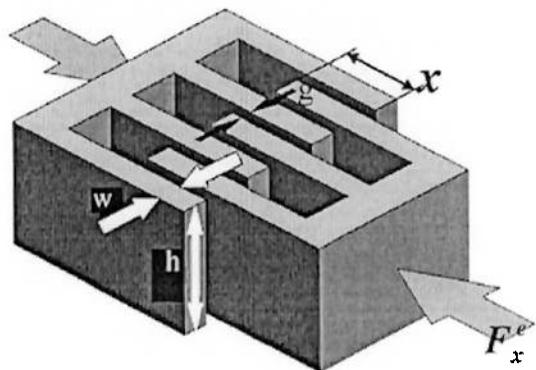


Figura 23 - Esquema da Configuração

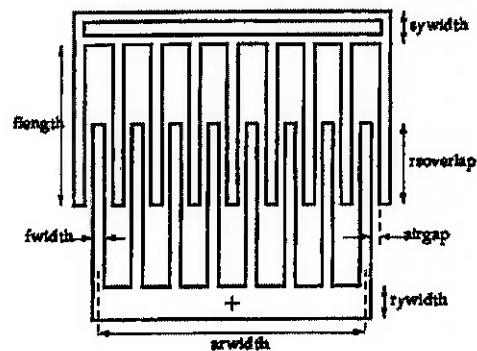


Figura 24 - Configuração para Movimento Paralelo

Em outra configuração, o comb drive assimétrico ou de deslocamento perpendicular, o espaçamento entre as interdigitações consecutivas não são simétricas.

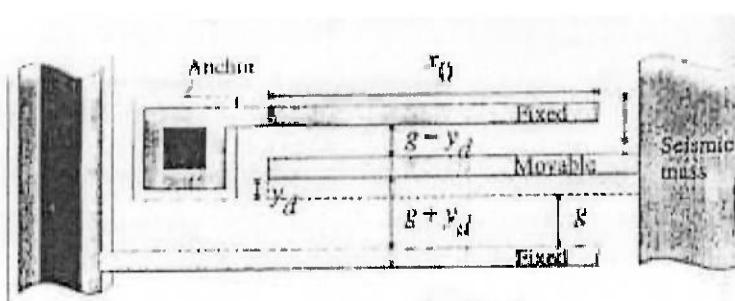


Figura 25 - Configuração para Movimento Perpendicular

7.1. Estudo Analítico

Devido o fato de que forças na superfície, como o atrito, são geralmente maiores que as forças produzidas em dispositivos microfabricados, o movimento das partes móveis são suportados por uma estrutura flexível que impede o contato entre tais partes móveis. Um esquema que permite visualizar um atuador eletrostático com partes fixas e móveis pode ser observado na figura abaixo.

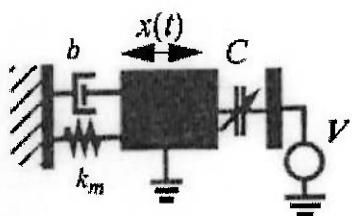


Figura 26 - Esquema do Comb Drive

Assumindo que a estrutura móvel possui apenas um grau de liberdade, a equação que relaciona o movimento $x(t)$ do sistema massa-mola-amortecedor com a força eletrostática $f(x, V)$ pode ser dada por:

$$(M + m) \ddot{x} + b \dot{x} + k_m x = f(x, V)$$

onde k_m denota a constante de mola na direção x, b o coeficiente de amortecimento.

7.1.1. Atuação Eletrostática em Comb Drives

A força eletrostática gerada em função de uma tensão V aplicada entre as placas de um capacitor é definida como:

$$f(x, V) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C(x)}{\partial x} \cdot V^2$$

onde $C(x)$ denota a capacidade entre as placas como uma função do deslocamento x . A expressão de $C(x)$ depende da configuração adotada, sendo que dois tipos mais comuns são os de movimento paralelo e perpendicular.

Desconsiderando as forças de atrito e assumindo pequenos deslocamentos em x , a capacidade entre o par de eletrodos de altura h e comprimento l com movimento paralelo é dado por:

$$C_1(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_a \cdot h \cdot (l_p + x(t))}{g_f}$$

Enquanto que a capacidade entre os eletrodos de movimento perpendicular é dada por:

$$C_2(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_a \cdot h \cdot l_p}{g_0 - x(t)}$$

onde ϵ_a denota a permissividade do ar ($\epsilon_a = 8,854187818 \cdot 10^{-2} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$), enquanto que g_f e g_0 indicam o espaçamento entre os eletrodos das configurações de movimento paralelo e perpendicular respectivamente.

Substituindo-se as equações acima para o capacitor de movimento paralelo, a força eletrostática entre os eletrodos é:

$$f(V) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_a \cdot h l_p}{g_f} \cdot V^2$$

enquanto que para o capacitor de movimento perpendicular a força é:

$$f(x, V) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_a \cdot h l_p}{(g_0 - x(t))^2} \cdot V$$

Note que a força do atuador eletrostático de movimento paralelo independe da deflexão do atuador. No entanto, a força produzida pela configuração de movimento perpendicular é maior que na outra configuração, fato que pode ser verificado assumindo deslocamento zero ($x(t) = 0$).

Para a configuração de movimento perpendicular, a força eletrostática resultante é a interação da força de atração de dois eletrodos, um de cada lado. Um localizado no lado a esquerda e outro a direita com espaçamento maior de αg_0 .

$$f(x, V) = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_a \cdot h \cdot l_p \cdot \left(\frac{1}{(g_0 - x(t))^2} - \frac{1}{(\alpha \cdot g_0 - x(t))^2} \right) \cdot V^2$$

Para minimizar a força contrária ao movimento desejado à esquerda, o valor de α deve ser o maior possível, mas aumentando α diminui a quantidade de eletrodos por unidade de área, reduzindo a força resultante do atuador. O valor de α otimiza a configuração depende dos valores de g_0 e das dimensões dos eletrodos, mas encontra-se usualmente entre 2 e 3.

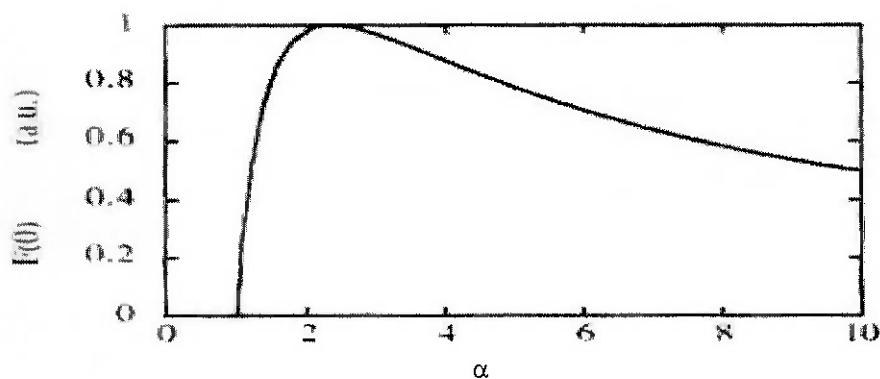


Figura 27 - Gráfico do valor ótimo de α

8. Mecanismos Flexíveis

Existem muitas diferenças entre as estruturas desenvolvidas pelo homem e aquelas encontradas na natureza. Uma delas é a forma como são manufaturados. Na natureza as estruturas encontradas não são constituídas por meios de montagens de partes, normalmente ela encontra-se na forma de uma peça única. Em contraste, o homem procura fabricar em partes e depois juntá-las para formar a estrutura desejada.

É verdade que o homem ainda não possui técnicas encontradas na biologia para fabricação de estruturas únicas, no entanto há diversas oportunidades para inovação imitando as estruturas sem montagens encontradas na natureza.

8.1. Rígido x Flexível

A diferença crucial no modo como o homem e a natureza produzem suas estruturas está no fato de a natureza poder desenvolver suas estruturas de modo crescente e gradual.

Tradicionalmente, artefatos desenvolvidos pelo homem atendem as necessidades de firmeza e rigidez. Na natureza, a estrutura tende a ser firme e flexível. A natureza é limitada pelos tipos de mecanismos que podem ser

desenvolvidos porque o organismo precisa ser uma única umidade. O uso de mecanismos flexíveis (Compliant Materials) possibilita converter a energia disponível em movimentos sofisticados como os encontrados em diversos organismos. Diversos insetos utilizam deste recurso para realizar saltos ou mesmo para bater as asas através da rápida liberação de energia dos músculos.

Apesar de a natureza tenha sempre se baseado no uso de mecanismos flexíveis, o homem tem se restringido a desenvolver estruturas e mecanismos completamente rígidos. Mesmo em casos que é necessário o uso de estruturas flexíveis, o desenvolvimento das estruturas dar-se-á através do uso de elementos rígidos que procuram simular flexibilidade.

Os efeitos do uso de estruturas flexíveis podem ser largamente usados pela comunidade científica, e muito pode ser aprendido por esta tecnologia. Estruturas flexíveis levam normalmente a fabricação mais simples e em alguns casos elimina a necessidade de operações de montagens.

A técnica utiliza da deformação elástica do material para promover movimento e força, fato longamente conhecido de civilizações antigas, como em seu uso para fabricação de catapultas mais simples. Algumas destes mecanismos estão tão bem integrados à estrutura que muitas vezes não são considerados mecanismos propriamente.

8.2. O Uso de Mecanismos Flexíveis

Alguns estudos têm demonstrado que nas mais variadas indústrias o custo pela montagem varia de 40 a 50 porcento do custo total do produto. É, portanto sensível os esforços de engenheiros em fabricar produtos que dispensem processos de montagens. Além das vantagens devido à produção de estruturas sem montagens, o uso de estruturas flexíveis tem outros benefícios.

Na vida real, a deformação elástica é inevitável, mesmo em estruturas ditas rígidas e em muitos casos ela pode ser revertida em um poderoso aliado. Explorando sua deformação para geração de força ou movimento pode-se encontrar uso em diversos setores da indústria como a automotiva, médica, aeroespacial ou em sistemas microeletromecânicos.

Mecanismos flexíveis são na verdade estruturas flexíveis que desenvolvem movimento ou força quando submetidos à deformação elástica quando submetidos à ação de força externa. A definição de mecanismo flexível engloba mecanismos onde elementos elásticos são utilizados meramente como molas, ou mesmo aqueles na qual a fonte primária de ação deve-se a deformação elástica e deste modo a atingir as mais diversas características força-deformação, geralmente, com a menor complexidade mecânica.

O número reduzido de partes, que em sua maioria são flexíveis, faz dos mecanismos flexíveis dispositivos de menor peso relativo. Menos juntas rígidas permitem diminuir o atrito, desgaste, ruído e a necessidade de lubrificante. Como as partes do mecanismo flexível são flexíveis tem se também que em casos de sobrecarga estas serão absorvidas pela estrutura sem ocorrência de falha do mesmo devido a sua maior flexibilidade.

Esses mecanismos não possuem movimento/deformação caso não haja capacidade de deformação. Para as estruturas que compõem os mecanismos flexíveis devem cumprir certas características de topologia, forma e tamanho. Estas três características permitem que a estrutura deforme sob a ação de uma força externa e entregue a força ou movimento requerido.

A topologia refere-se a inter-relação do material com as diferentes características de cada parte da estrutura do mecanismo como ocorre no local de aplicação de força, regiões fixas e as possuem qualquer conexão externa. A topologia define o esqueleto da estrutura. A forma e tamanho dos segmentos individuais vêm, portanto, definir a configuração final do mecanismo.

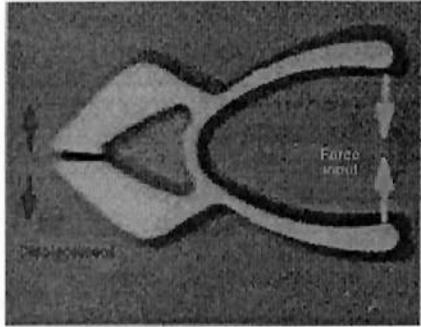


Figura 28 - Mecanismo Flexível

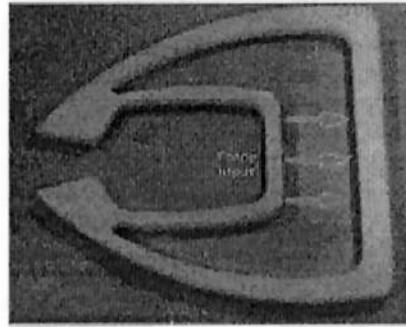


Figura 29 - Mecanismo Flexível

8.3. Aplicação a MEMS

O ímpeto original do estudo de micromecanismos flexíveis veio de estudos em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) conduzidos na Universidade de Michigan. Vários pesquisadores sentindo dificuldades em realizar montagens de microestruturas em razão da falta de ferramentas adequadas começaram a investigar meios de minimizar a necessidade de montagem, ou mesmo, eliminá-las o que acabou por levar ao estudo de mecanismos flexíveis. Além disso, aliado ao fato de eliminar a necessidade de operação de montagens, o uso de mecanismos flexíveis acabou por solucionar problemas com atritos e desgaste, fatores preocupantes em projetos de MEMS.

Na natureza estruturas flexíveis desempenham papel muito importante, principalmente quando se analisa em escalas menores. Cerca de 90 porcento de animais são invertebrados (falta de estrutura esquelética rígida), e a porcentagem de seres invertebrados cresce a medida que se diminui a escala. Em microorganismos, nível de escala em que se encontram os MEMS, as estruturas flexíveis reinam absolutamente. E não é mero acaso que a aplicação de estruturas flexíveis encontra imenso uso na natureza. O fator de escala muda muitas coisas.

A pequena escala e as diferentes razões dimensionais (a espessura é normalmente bem menor que outras dimensão) tornam tais estruturas naturalmente flexíveis. Em essência, torna-se muito difícil fazer MEMS comportarem-se como um corpo rígido.

Para aplicações em micro-pinças pode-se ter micro-estruturas como as mostradas abaixo, que convertem e amplificam o deslocamento em um eixo (atuação do comb drive), em um deslocamento em outro eixo perpendicular ao primeiro (movimento da micro-pinça).



Figura 32 – Deformação da Estrutura

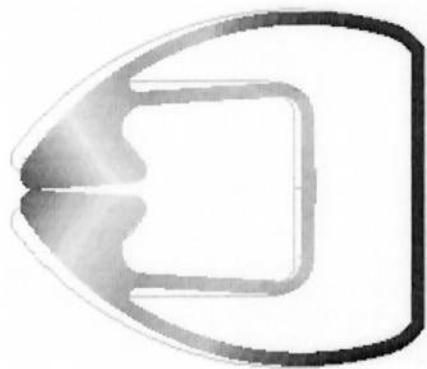


Figura 33 - Estrutura de Amplificação



Figura 30 - Estrutura de Amplificação

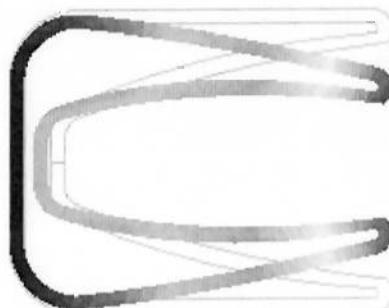


Figura 31 – Deformação da Estrutura

9. Materiais para Microfabricação

O sucesso dos Sistemas Microeletromecânicos como importante inovação tecnológica depende em grande parte de soluções relacionadas ao material utilizada para fabricação dos mais diversos e complexos dispositivos MEMS. O fator de escala dos MEMS permite novas oportunidades para explorar materiais que normalmente não estariam disponíveis para produção em grande escala ou mesmo aproveitar as características diferenciadas do material em microescala.

A performance de microsistemas dependem dos materiais no qual são produzidos, o que também determinam o tipo de processo aplicado para a manufatura. Esta combinação de material e processo de fabricação oferece um novo tipo de classificação temporal de MEMS, além das funções e aplicações. Material e processo podem ser utilizados para definir três categorias. A fase inicial, que continua até os dias atuais, utiliza materiais atualmente disponíveis na indústria, principalmente, de circuitos integrados empregando novos processos de fabricação.

Na segunda fase, iniciada posteriormente, mas que também continua atualmente, envolve a introdução de novos materiais, disponíveis em outros setores, associados a seus respectivos processos; enquanto que a terceira e futura fase prevê a incorporação de novos materiais ainda não empregados na indústria.

Na primeira fase, os materiais desenvolvidos para circuitos integrados em 1960, quando apareceram os MEMS, eram em poucos números. Basicamente os materiais eram duas formas derivadas de silício: o primeiro era um substrato de um único cristal de silício e o outro camadas finas de silício policristalino. O diferencial na produção de MEMS desta fase foi a utilização de material de sacrifício sobre o substrato, que depois é removido por dissolução química de modo a permitir a estrutura mecânica deixada livre para flexionar ou rotacionar. Os processos mais comuns eram o bulk e surface micromachining.

Na segunda fase, a preocupação com a pureza na tecnologia de fabricação de semicondutores, que poderia criar defeitos no funcionamento dos circuitos, tornou clara que o emprego de novos materiais para a fabricação de MEMS seria de grande valor. O uso de materiais piezelétricos era um primeiro exemplo.

O grande passo para novos materiais foi o emprego de silício com um único cristal de quartzo. Embora seja de mesma composição química que os filmes de dióxido de silício, longamente utilizados na fabricação de transistores, o cristal de quartzo não fazia parte da produção em larga escala de semicondutores. Além do quartzo foram utilizados na fabricação de MEMS filmes de novos materiais piezelétricos tanto para sensores e atuadores juntamente com novas técnicas de produção que permitissem boa aderência destes filmes ao substrato. Dos processos desenvolvidos nesta fase o LIGA foi o que obteve melhor aceitação.

Já na terceira fase, espera-se encontrar novos materiais com propriedades mais atrativas. A esperança em achar novos materiais deve-se ao rápido desenvolvimento na manipulação da composição e da estrutura de materiais, como supercondutores ou biomateriais.

9.1. Silício como Material para MEMS

De todos os materiais empregados na fabricação de MEMS, o que tem sido mais utilizado pela indústria é o silício.

A descoberta de propriedade únicas do silício e o desenvolvimento da eletrônica com o silício tem sido um dos mais importantes eventos dos últimos anos. Enquanto a tecnologia da eletrônica tem se desenvolvido bastante, diversos pesquisadores perceberam que o silício possui também excepcionais propriedades mecânicas. É um material de excelente durabilidade e elasticidade. Quando os métodos de fabricação desenvolvidas a partir da microeletrônica são aplicadas, estruturas mecânicas muito finas podem ser produzidas. A combinação do uso das propriedades mecânicas e elétricas do silício foram primeiro utilizadas para a fabricação de sensores.

Com o progresso das pesquisas foi possível estudar outras propriedades do material como suas características aos fenômenos termodinâmicos, ópticos, magnéticos e hidrodinâmicos na microescala.

O domínio de uso do silício deve-se a diversos fatores:

1. silício oferece a possibilidade de integração monolítica;
2. As propriedades do silício já são muito bem conhecidas;
3. A tecnologia do silício está bastante avançada. Vários processos, assim como equipamentos da indústria eletrônica podem ser empregados na fabricação de microestruturas, fazendo uso também das indústrias já existentes que trabalham com o material;
4. Nenhum outro material conhecido pode ser fabricado na forma monocristalina e com a pureza do silício a preço razoável.

10. Fabricação de Microestruturas

Microfabricação é o processo de fabricação de microestruturas, geralmente utilizando como material o silício. As técnicas empregadas mais comuns são a micro usinagem de volume, a microusinagem de superfície e o processo LIGA (litografia, eletroformação e moldagem).

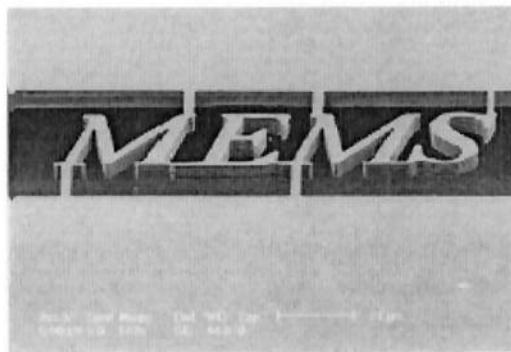


Figura 34 – Exemplo de uma microestrutura utilizando processos de microfabricação

O propósito do processo de microusinagem de volume é seletivamente retirar quantidades significativas de material do substrato. Esta técnica é a que apresenta maior desenvolvimento e cuja aplicação é utilizada pela indústria há vários anos. A microusinagem de volume é muito utilizado em fabricações de acelerômetros de

silício, e sendo menos utilizados em sensores, microválvulas ou diversas outras estruturas singulares.

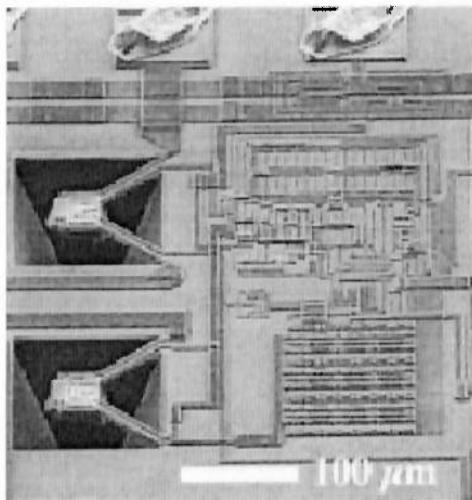


Figura 35 - Exemplo de Estrutura Suspensa utilizando o Processo Bulk Micromachining

O princípio de atuação de tal técnica reside na retirada de material, principalmente, através do uso agressivo de agentes químicos, podendo produzir estruturas compatíveis com os circuitos eletrônicos ou ainda com microestruturas, desde que o processo seja desenvolvido apropriadamente. O processo pode ser realizada através de processo isotrópico ou anisotrópico, ou ainda, por ambos. No processo isotrópico, a retirada de material ocorre de forma homogênea em todas as direções, enquanto que no processo anisotrópico a retirada do material dá-se de acordo com as diferentes características de orientação cristalográficas do substrato,

causando taxas de retirada diferentes nas diferentes direções. Outro fator determinante no processo refere-se à fase do reagente que pode ser líquida, na forma de vapor ou mesmo plasma.

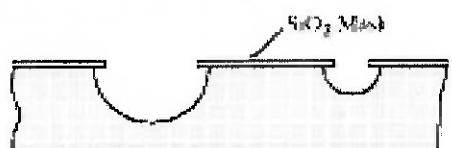


Figura 37 - Processo Isotrópico

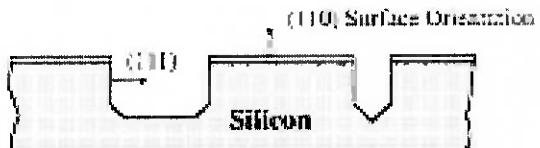


Figura 36 - Processo Anisotrópico

A retirada de material dá-se através da reação de oxidação do material do substrato de modo que o mesmo possa ser fisicamente removido do substrato.

Uma desvantagem deste processo consiste na dificuldade em se produzir dispositivos muito pequenos, que vem servindo de intenso estudo na Universidade de Michigan.

Outra técnica muito utilizada é o processo de microusinagem de superfície. Ao contrário da microusinagem de volume, este processo não interfere no interior do substrato. Na realidade o processo consiste na adição ou retirada de finas camadas de material ao substrato. Essas finas camadas de material são normalmente constituídos de polisilício ou óxido de silício.

O uso de materiais de sacrifício é a base do processo que consiste no acréscimo de uma camada de material para posterior remoção, geralmente por meio do uso de agentes químicos, para benefício de outro material depositado.

O processo de microusinagem de superfície é relativamente simples, porém versátil e poderoso instrumento para confecção de microestruturas. No entanto, a fragilidade das estruturas e dificuldade de prever variação das propriedades do material em decorrência de sua pequena escala ($1 \mu\text{m}$) podem gerar obstáculos para algumas aplicações.

Um último processo para fabricação de MEMS é a moldagem, que consiste no uso de um molde para depósito de material. A técnica mais utilizada neste processo é denominada LIGA. Ela permite fabricar estruturas altas com resolução submicrométrica. As altas estruturas – dimensões laterais de poucos micrômetros e verticais de mais de $1000 \mu\text{m}$ – são obtidas através de aplicação de litografia por raios X, eletroformação e processos de moldagem.

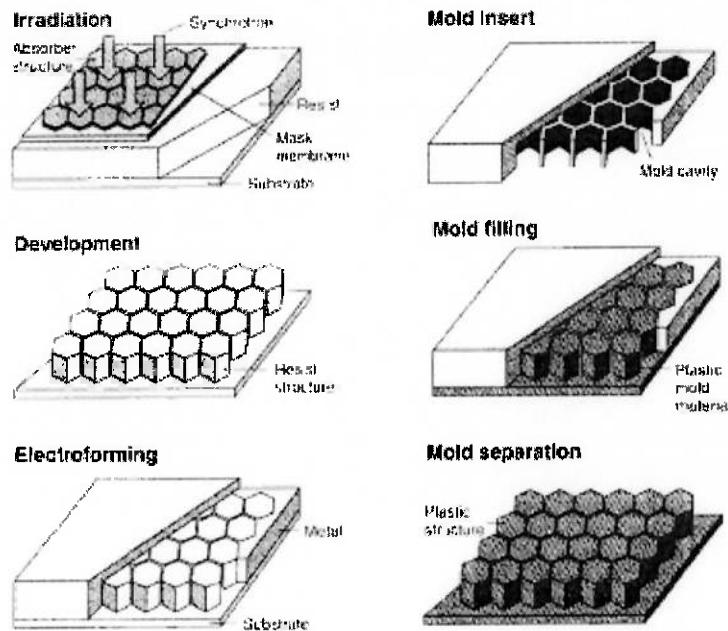


Figura 38 - Seqüência do Processo LIGA

O processo LIGA começa com a geração de um modelo através do uso de litografia em substrato de material condutivo. Utilizando o modelo como molde que será preenchido por material de baixa viscosidade - normalmente um polímero - e aplicando a eletroformação pode-se obter um modelo similar ao original ao retirar-se o molde após a cura do material de preenchimento.

11. Definição da Estrutura:

A escolha do tipo de estrutura a ser fabricada deveria permitir que seu estudo e fabricação pudessem ser realizados em locais de permitido acesso, utilizando recursos de baixo custo e equipamentos disponíveis para uso. Para tanto foi definido que a estrutura a ser fabricada seria uma própria estrutura que viria a ser objeto de estudo na pós-graduação; em função de sua simplicidade, já que não apresentava partes com grande complexidade, mas que atendia os requisitos deste trabalho: verificar a funcionalidade do mecanismo de acionamento de uma pinça para manipulação biológica (célula animal), o qual seria fabricada em cobre, devido à acessibilidade ao material e seu reduzido custo.

A estrutura escolhida consiste de uma estrutura comb drive (fabricada por corrosão isotrópica) com movimento perpendicular das interdigitações de forma que o comb drive móvel estaria conectado à pinça e engastado a uma viga de seção quadrada, cuja função seria atuar como uma mola de torção de modo que a estrutura móvel pudesse retornar ao estado de repouso quando não acionado e ao mesmo tempo que impedisse que as duas estruturas comb drive entrassem em contato ficando em estado de curto-circuito, danificando assim os equipamentos eletrônicos conectados ao sistema.

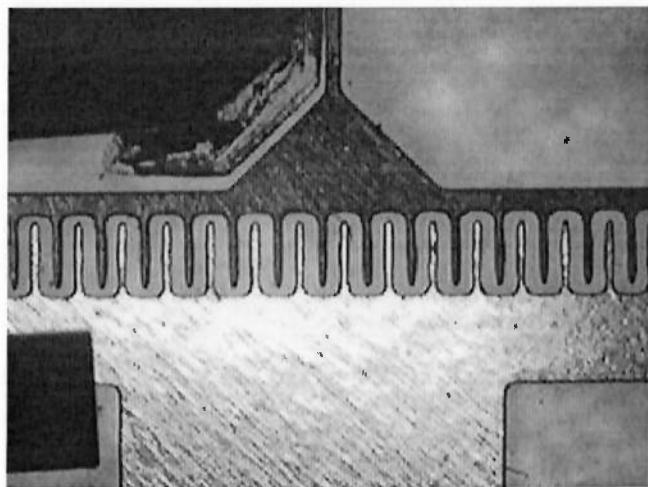


Figura 39 - Estrutura Comb Drive com a viga como mola de torção

Para estudo de toda a estrutura foi necessário que a viga pudesse ser representada de forma analítica de modo que seu comportamento dinâmico foi representado pela seguinte equação:

$$Y_{máx} = \frac{P.l}{3.E.J}$$

onde $Y_{máx}$ denota a deformação observada ao final de uma viga de comprimento l e módulo de elasticidade E ($E_{cobre}=120$ GPa).

Outro componente da estrutura de fundamental importância para este estudo é a pinça que será a responsável pela manipulação da célula. Para a fabricação da estrutura foi adotado dois tipos de pinça, uma pinça com estrutura simples constituída somente por duas placas que deveriam prensar a célula e outra com configuração topológica mais complexa, conectada a uma estrutura flexível responsável pela amplificação de movimento, que foi objeto de estudo e tema de trabalho de formatura de Thaís Paes de Almeida Felipelli, aluna da turma de Engenharia Mecânica - Automação e Sistemas de 2002 da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

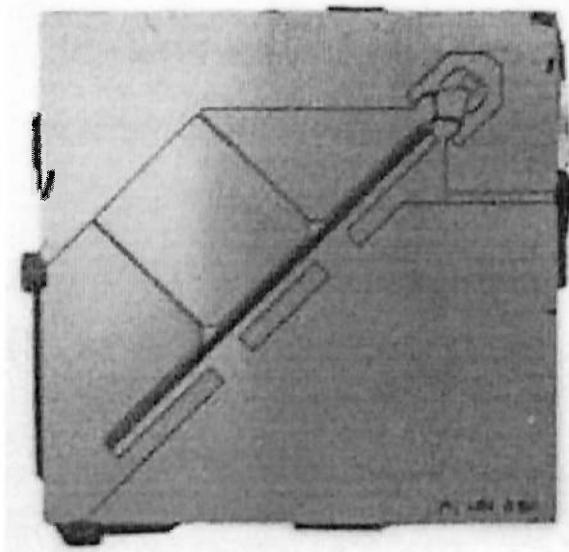


Figura 40 - Comb Drive com sistema de amplificação de movimento na garra

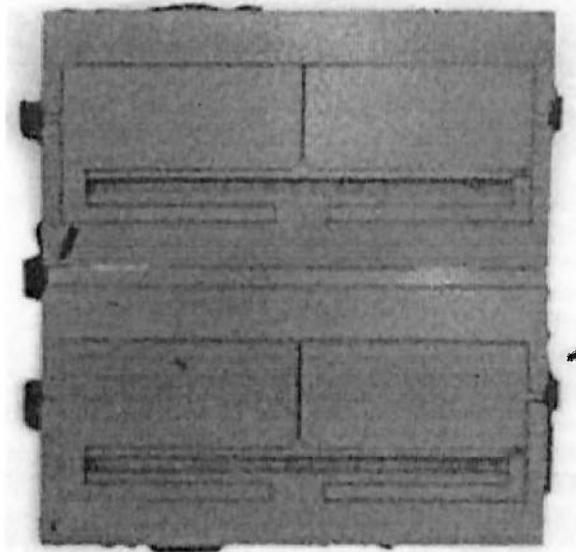


Figura 41 - Comb Drive com garra simples

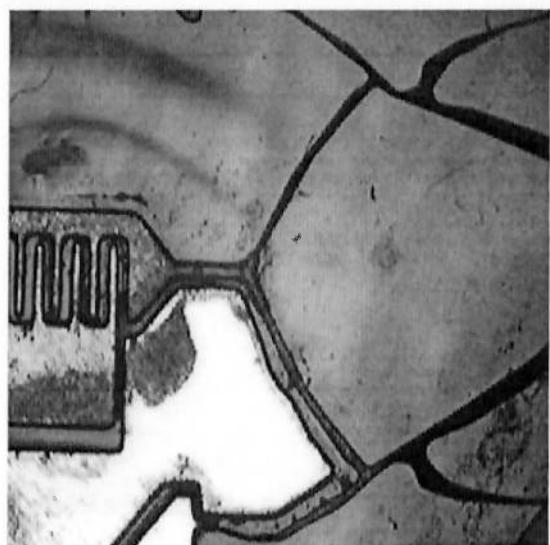


Figura 42 - Detalhe do acoplamento do sistema de amplificação de movimento

12. Simulação em Elementos Finitos:

Com o objetivo de introduzir um estudo sobre o comportamento do funcionamento da estrutura, foi realizado simulações em programa de elementos finitos Ansys, de modo que fosse possível visualizar a relação da diferença da tensão aplicada sobre os pares de comb drive o deslocamento resultante da parte móvel.

Para as simulações foi utilizado o elemento TRANS126 que associado a outros elementos como massa, mola e amortecedor, permite simular toda estrutura do comb drive.

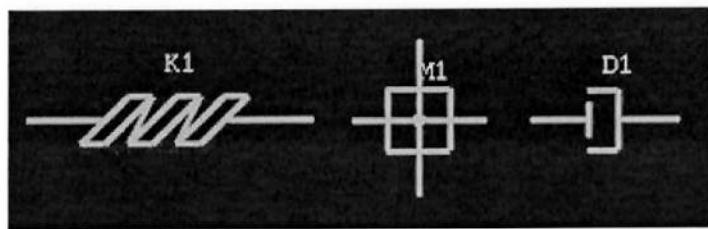


Figura 43 - Mola, Massa e Amortecedor

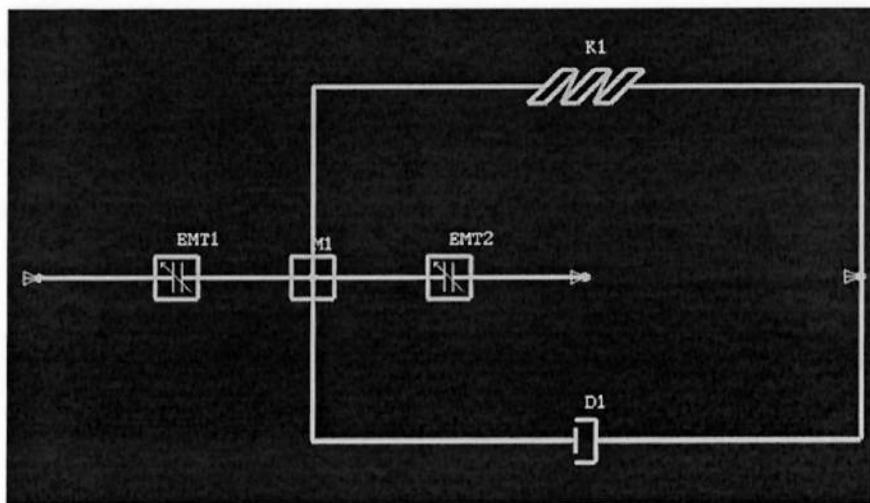


Figura 44 - Associação do elementos TRANS 126 com mola, massa e amortecedor

Para a simulação em Ansys foi adotado duas configurações básicas. Na primeira, as interdigitações do comb drive possuíam largura (w) de 150 μm , comprimento (l_d) de 800 μm e espessura de 100 μm com espaçamento entre as interdigitações de 50 e 90 μm e cujos dados seguem abaixo.

Voltagem (V)	Deslocamento (microns)
0,5	0,004
1	0,018
2	0,072
5	0,459
10	2,007
15	5,358
16	6,879
17	8,582
18	11,178
20	49,998
25	49,999
50	146,550

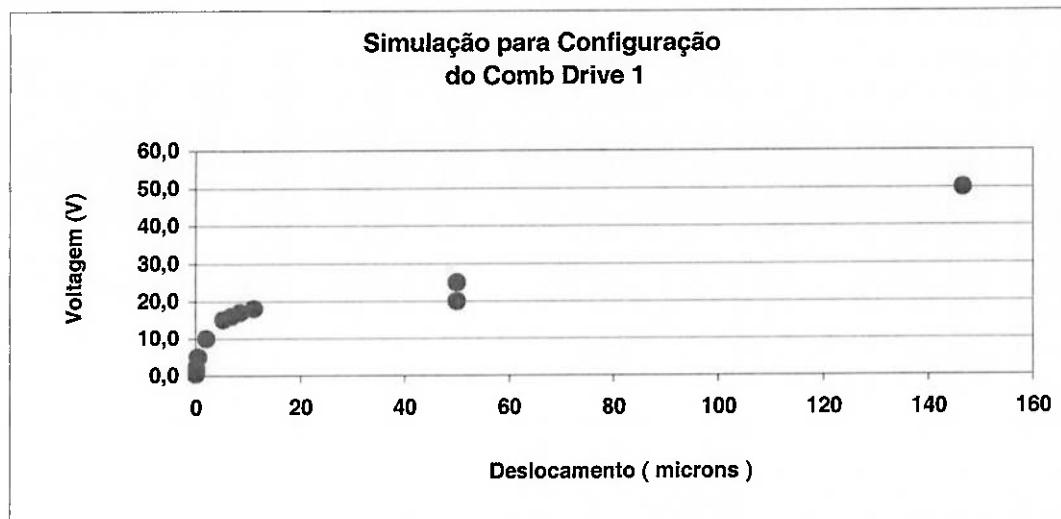


Figura 45 - Gráfico da simulação para Comb Drive 1

Em uma segunda simulação as interdigitações do com drive possuíam as seguintes características: largura (w) de 70 μm , comprimento (l_d) de 700 μm e espessura de 60 μm com espaçamento entre as interdigitações de 50 e 90 μm e cujos dados seguem abaixo.

Voltagem (V)	Deslocamento (microns)
0,5	0,050
1	0,203
2	0,812
3	2,069
4	4,184
5	8,003
6	49,998
10	321,140

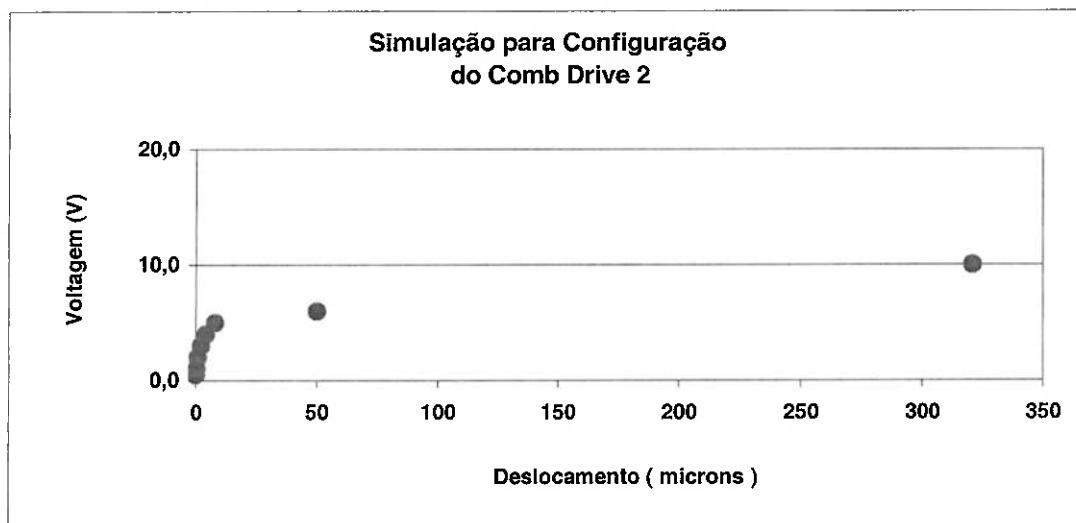


Figura 46 - Gráfico para simulação do Comb Drive 2

13. Fabricação

Para a fabricação de toda a estrutura da pinça e do comb drive foi utilizado as dependências dos laboratórios de microfabricação do LNLS, em Campinas, e do LME, em São Paulo.

Com a finalidade de tornar os processos relacionados à fabricação do dispositivo mais claros, será feita uma breve introdução dos laboratórios.

13.1. LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é um centro nacional de Ciência e Tecnologia. No laboratório biólogos, químicos, físicos e engenheiros de materiais encontram uma infra-estrutura adequada de equipamentos para realizar pesquisas em materiais.

No LNLS está o mais importante instrumento científico do Hemisfério Sul: uma fonte de luz síncrotron, que emite feixes de raios-X, ultravioleta e infravermelho, utilizados para investigar propriedades atômicas e moleculares dos materiais. Também no LNLS estão microscópios potentes e equipamentos para permitir a adequada preparação de amostras de materiais.

No laboratório de microfabricação, as principais áreas de pesquisa seguem nos seguintes temas:

Litografia Profunda com Raios-X

Litografia Profunda com Ultravioleta

Litografia "Soft"

Dispositivos e Microsistemas.

13.2. LME – Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP

O LME foi criado em 1968 num esforço de pioneirismo dos professores Prof. Dr. Carlos Américo Morato de Andrade e do Prof. Dr. Marcos Eisencraft com objetivo de propiciar aos professores do antigo Departamento de Engenharia de Eletricidade um ambiente de pesquisa para o desenvolvimento de trabalhos científicos e tecnológicos nas áreas de microeletrônica e microondas.

Inicialmente financiado pelo BNDE, FAPESP e CNPq, o laboratório de microeletrônica tem recebido apoio contínuo da FINEP, TELEBRÁS E FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL, para desenvolver atividades de pesquisa e desenvolvimento, apoio à indústria brasileira e formação de recursos humanos.

As atividades do LME incluem:

- áreas de processos de microeletrônica
- área de projetos de circuitos integrados
- área de dispositivos de silício amorfo
- área de circuitos integrados híbridos
- área de testes e caracterização de dispositivos

13.3. Processos

Para a fabricação das estruturas microscópicas foram utilizados recursos dos laboratórios de microfabricação do Departamento de Engenharia Elétrica e do LNLS, utilizando as técnicas de corrosão (etching) em chapas de cobre.

O processo de fabricação consiste basicamente em desenvolver as estruturas em programa Autocad que, depois, será transferido para o programa Corel Draw para a realização do fotolito, que consiste na impressão do desenho das estruturas em papel especial com resolução de $20 \mu\text{m}$; finalizando o processo com as etapas de litografia e corrosão.

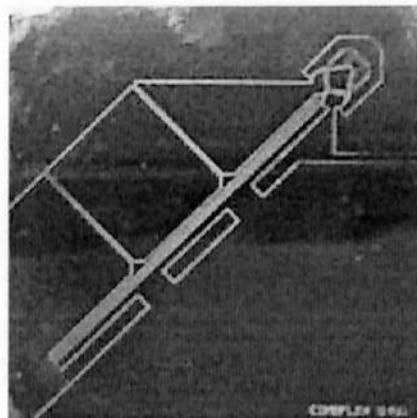


Figura 47 - Máscara do fotolito

Litografia

O processo de litografia caracteriza-se pela demarcação das regiões que irão sofrer corrosão, protegendo toda as demais partes.

Primeiramente faz-se a limpeza das placas de cobre de espessura 60 µm, retirando todas as impurezas e gordura através da aplicação de ácido sulfúrico. Posteriormente é feito a aplicação de HMDS, que melhora aderência do fotorresiste, e de líquido fotorresiste (S-1881) em um equipamento Spinner permitindo, assim, a deposição dos líquidos em toda a região da placa de cobre com espessura controlada.

A placa de cobre, com o fotorresiste já aplicado, é então posto a exposição de raios ultra-violetas com o fotolito como camada intermediária, permitindo, assim, que apenas as regiões a serem corroídas sejam expostas. Ao final da etapa, é feita a revelação, quando as regiões expostas ao ultra-violeta têm o líquido fotorresiste removidos.

Corrosão

Para a corrosão em percloreto de ferro foi feita a fixação da placa de cobre em uma lâmina de acrílico utilizando borracha de silicone para permitir que as estruturas ficasse suspensas, de modo a não restringir o movimento dos mesmos.

A corrosão foi realizado com a imersão do cobre em bêquer contendo percloreto de ferro a uma temperatura de 70° C, por aproximadamente 4 minutos, com constante agitação para permitir melhor penetração do líquido.

14. Resultados

Nas primeiras fabricações foram utilizadas comb drives com interdigitações de 70 µm de largura e 700 µm de comprimento, além de espaçamento entre dentes de 50 e 90 µm, fabricadas em chapa de cobre com 100 µm de espessura no LME da Escola Politécnica.

Ao realizar inspeções nos exemplares foi constatado que a maioria das interdigitações foi removida durante o processo de corrosão, mesmo com a proteção do fotorresiste, enquanto que em outros não foi constatado a corrosão completa, ficam ainda os comb drives (móvel e fixo) conectados.

O monitoramento do processo com microscópio óptico revelou que as interdigitações sofreram danos nas regiões laterais devido ao ataque do percloroeto de ferro no processo de corrosão, ficando os mesmos com dimensões menores que as especificadas. A continuação da corrosão para a separação completa das interdigitações causou uma deterioração estrutural completa do dispositivo com conseqüente aumento dos espaçamentos para 80 e 120 µm.

Na tentativa de contornar as dificuldades encontradas nas primeiras fabricações foi desenvolvida novas estruturas com interdigitações maiores e espaçamentos menores que seriam fabricadas no LME da Escola Politécnica e no

LNLS em Campinas. No novo projeto, as interdigitações apresentavam 150 µm de largura, 800 µm de comprimento e espaçamentos de 20 e 50 µm, sendo que para a fabricação foi utilizado uma chapa de cobre com 60 µm de espessura, que permitiria menor tempo de exposição à corrosão e consequentemente menores danos às interdigitações.

Embora as estruturas fossem maiores, observou-se os praticamente os mesmos resultados que nas primeiras fabricações com uma parte das interdigitações inteiramente danificadas, enquanto que outras não apresentavam ainda corrosão completa.

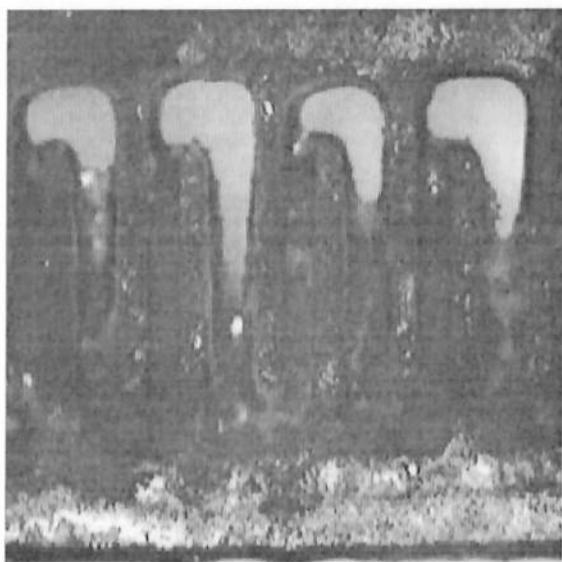
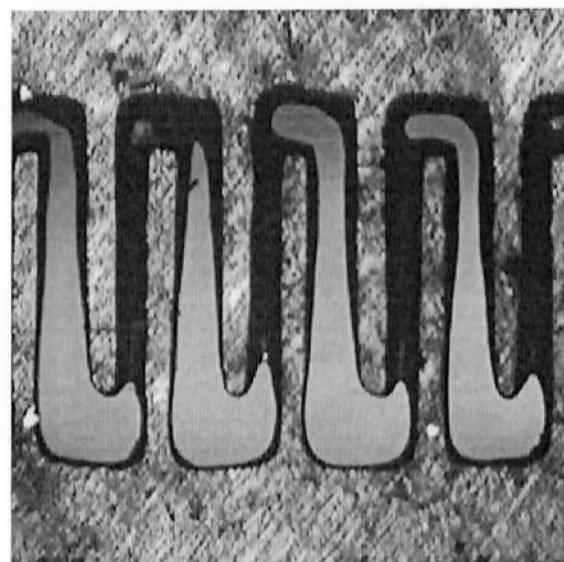


Figura 48 - Detalhe das interdigitações não corroídas



**Figura 49 – Região das interdigitações não totalmente corroídas,
porém com estrangulamento da base**

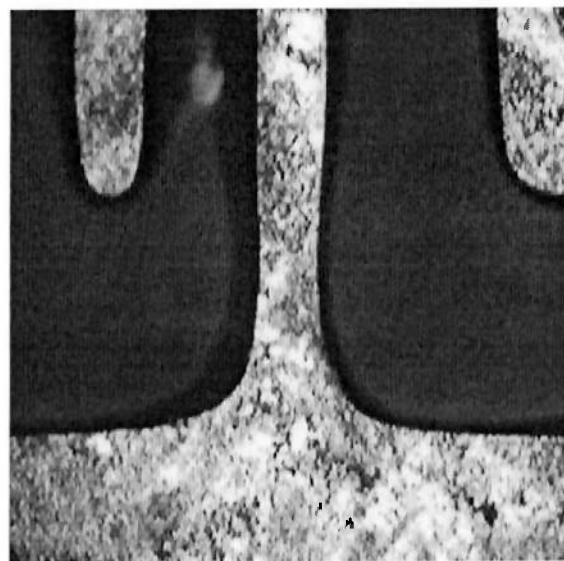


Figura 50 - Detalhe da base

15. Conclusão

Uma dificuldade encontrada na realização do experimento foi a dificuldade em realizar o alinhamento das interdigitações para comprovação de seu funcionamento como previsto, uma vez que a utilização de chapas de pouca espessura (60 µm) não garantiam planicidade da estrutura, o que poderia afetar a interação eletrostática entre os comb drives.

Além disto, pôde-se observar que as atuais técnicas de microfabricação, como a eletrocorrosão, disponíveis mostraram-se eficientes na fabricação de diversos microdispositivos, porém em estruturas de maior complexidade e de dimensões pequenas (menores que 20 µm) observou-se certa dificuldade em controlar alguns dos parâmetros dimensionais, como a espessura das interdigitações em função da presença do ataque corrosivo isotrópico do percloreto de ferro nas regiões protegidas pelo fotoresistente ocorridos possivelmente pela corrosão lateral presente nas regiões abaixo à proteção. Ainda, observou-se que os equipamentos utilizados, nos laboratórios de microfabricação do LME e do LNLS, apresentavam idade avançada e em alguns casos com falta de manutenção regular; além do próprio ambiente de fabricação (sala limpa) não estar isolado totalmente podem ter comprometido a fabricação do dispositivo e o teste do mesmo.

Anexos

Trabalho de Formatura

Croneograma Físico

“Estudo de uma Micropinça para Manipulação de Material Celular”

Nome do Aluno: Marcelo Ishikawa
Nº USP: 2934260
Orientador: Prof. Ricardo Cury Ibral

Bibliografia

- [1] F. Horashima, "Integrated Micro-Motion System", The Third Toyota Conference.
- [2] T. Fukuda, W. Menz, "Micro Mechanical Systems", (1998).
- [3] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, K. E. Petersen, "Bulk Micromachining of Silicon", (1998), vol 86.
- [4] G. Thornell, M. Bexell, J. Schweitz, S. Johanson, "Desing and Fabrication of a Gripping Tool for Micromanipulation", (1996) 428-433.
- [5] M. Bao, W. Wang, "Future of Microelectromechanical SystemS (MEMS)", (1996) 135-141.
- [6] S. M. Spearing, "Materials Issues in Microelectromechanil Systems (MEMS)", (1999) 179-196.
- [7] H. Fujita, H. Toshiyoshi, "Micro Actuators and their Applications", (1998) 637-640.
- [8] E. Thielicke, E. Obermeier, "Microactuators and Technologies", (2000) 431-455.
- [9] K. Suzuki, "Single Crystal Silicon Micro-Actuators", (1990).
- [10] K. Morishima, F. Arai, T. Fukuda, H. Matsuura, K. Yoshikawa, "Screening of Single Escherichia coliin a Microchannel System by Electric Field and Lase Tweezers", (1998) 273-278.

- [11] D. J. Nagel, "Materials and Processes for Microsystems", (1998) 138-145.
- [12] P. Lee, D. R. Ciarlo, P. A. Kruevitch, S. Lehew, J. Trevino, M. A. Northrup, "A Practical Microgripper by Fine Alignment, Eutectic Bonding and SMA Actuation", (1996) 755-759.
- [13] S. Ballandras, S. Basrour, L. Robert, S. Megtert, P. Blind, M. Rouillay, P. Bernède, W. Daniau, "Microgrippers Fabricated by LIGA Technique", (1997) 265-272.
- [14] W. Lang, "Silicon Microstructuring Technology", (1996) 1-55.
- [15] M. T. A. Saif, N. C. MacDonald, "A Millinewton Microloading Device", (1996) 65-75.
- [16] P. B. Chu, P. R. Nelson, M. L. TachikiK. S. J. Pister, "Dynamics of Polysilicon Parallel-PlateElectrostatic Actuators", (1996) 216-220.
- [17] J. Bryzek, K. Petersen, W. McCulley, "Micromachines on the March", (1994).
- [18] J. Fluitman, "Microsystem Technology: Objectives", (1996) 151-166.
- [19] R. Legtenberg, E. Berenschot, M. Elwenspoek, "A Fabrication Process for Electrostatic Microactuators with Integrated Gear Linkages", (1997) 234-241.
- [20] H. Chang, Y. Kim, "UV-LIGA Process for High Aspect Ratio Structure Using Stress Barrierand C-Shaped Etch Hole", (2000) 342-350.
- [21] G. K. Ananthasuresh, "Designing Compliant Mechanisms", (1995) 93-96.

- [22] M. I. Frecker, G. K. ananthasuresh, S. Nishiwaki, N. Kikuchi, S. Kota, "Topological Synthesis of Compliant Mechanisms Using Multi-Criteria Optimization", (1997) 238-245.
- [23] L. Saggere, S. Kota, "Synthesis of Distributed Compliant Mechanisms for Adaptive Structures Applications: Na Elasto-Kinematic Approach", (1997) 1-12.
- [24] J. L. A. Yeh, C. Hui, "Electrostatic Model for an Asymmetric Combdrive", (2000) 126-135.
- [25] W. A. Johnson, L. K. Warne, "Electrophysicsof Micromechanical Comb Actuators", (1995) 49-59.
- [26] M. C. Carrozza, P. Dario, A. Fenu, "Manipulation Biological and Mechanical Micro-Objects Using LIGA_Microfabricated End-Effectors", (1998) 1811-1816.