

AULA

ELÉCTRODOS

Introdução às Microtecnologias no Silício

Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica Industrial e Computadores

4º ano, 1º semestre

2014-15

Alexandre Ferreira da Silva

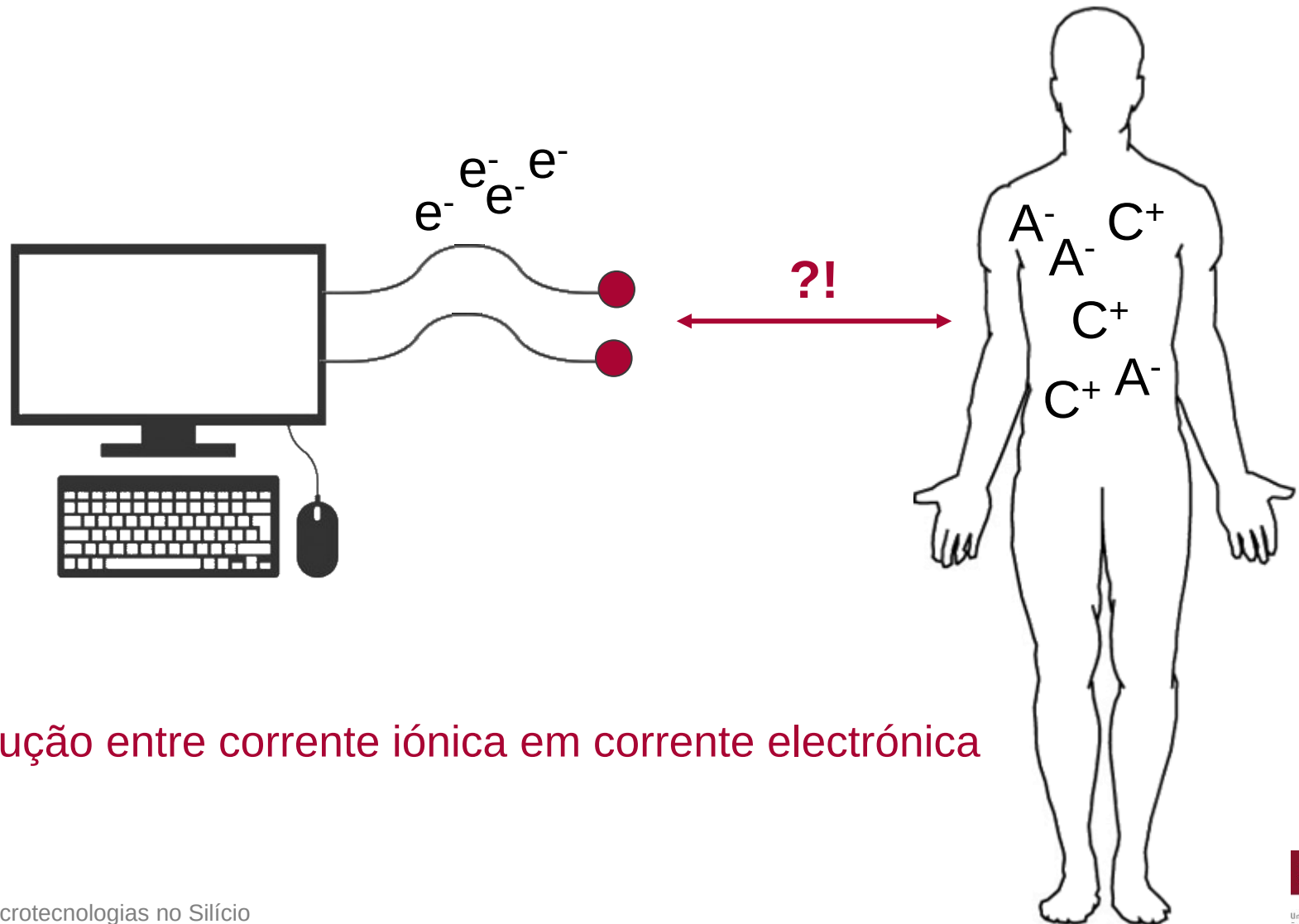
O que é um eléctrodo?

ACESSO AO SINAL BIOELÉCTRICO



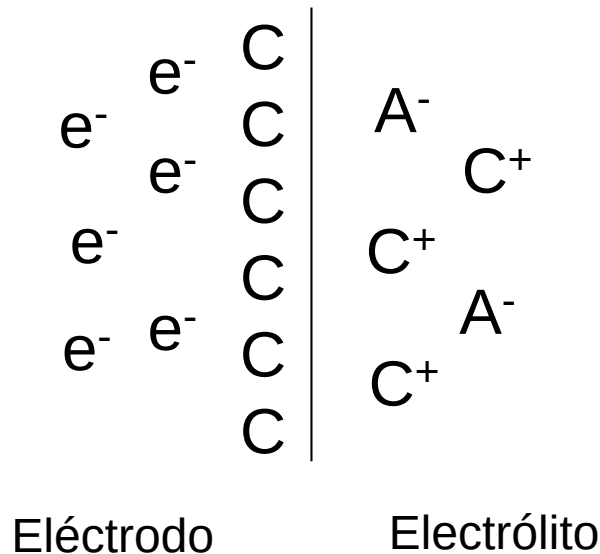
MAS É ASSIM TÃO SIMPLES?

ACESSO AO SINAL BIOELÉCTRICO

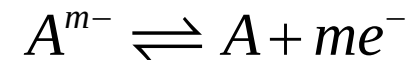
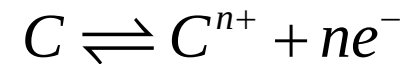


Transdução entre corrente iónica em corrente electrónica

TRANSDUÇÃO IÓNICA



- Para uma carga atravessar a interface (considerando que não há electrões, cations ou anions livres), algo tem de acontecer
- Reacção Química
- Oxidação-Redução



- Eléctrodo -> Electrólito - OXIDAÇÃO
- Electrólito -> Eléctrodo - REDUÇÃO

POLARIZAÇÃO

■ Eléctrodos Perfeitamente Polarizáveis

- Nenhuma carga flui quando corrente é aplicada
- Metais nobres estão mais próximos de materiais perfeitamente polarizáveis
 - *Materiais difíceis de oxidar e dissolver*
 - *Inércia Química*
 - *Platina, Ouro*
- A corrente não atravessa mas altera a concentrações de iões na interface
- Comportam-se como condensadores

POLARIZAÇÃO

■ Eléctrodos Perfeitamente Não Polarizáveis

- Todas as cargas atravessam a interface
- Nenhum potencial de polarização é gerado
- Não exibem qualquer acumulação do potencial de polarização
- Comportam-se como resistências

POLARIZAÇÃO

- Nenhum dos eléctrodos anteriores pode ser fabricado
- Todos os eléctrodos apresentam um comportamento intermédio mas aproximam-se mais de um tipo de comportamento ou de outro.

Qual o tipo de comportamento mais interessante?

TIPOS DE ELÉCTRODOS

ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-I)

■ Eléctrodos de Placa Metálica

- Superfície extensa
- Históricos mas ainda em serviço
- Disco Metálico
 - *EMG*
 - *Aço Inoxidável, platina, ouro*
 - *Minimização de reacções químicas*
 - *Artefacto de movimento*
- Descartáveis
- Baratos



ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-I)

- **Eléctrodos de Placa Metálica**
- **Vantagens**
 - Reutilizáveis
- **Desvantagens**
 - Baixa imunidade ao ruído
 - Não adequados a utilizações prolongadas
 - Requerem gel (electrólito)
 - Requerem esterilização e limpeza
 - Área de contacto variável
 - Movimento do gel gera alterações do E_{hc}



ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-II)

■ Eléctrodos de Sucção

- Sem adesivos ou bandas
- Utilização por curtos períodos de tempo
- ECG pré-cordial (Peito)
- Área de contacto pequena
 - *Impedância elevada*



ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-III)

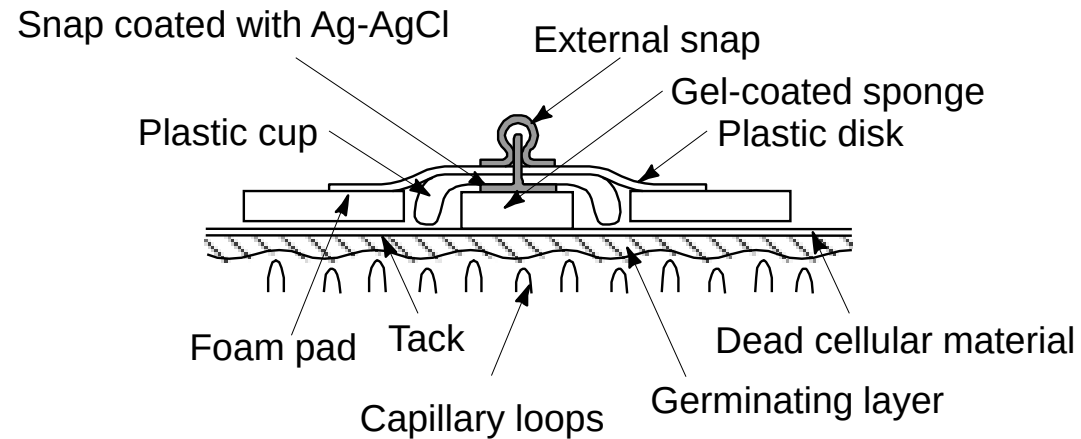
■ Eléctrodos Flutuantes

■ Vantagens

- Certa imunidade ao ruído
- Descartáveis
- Facilmente disponíveis
- Baixo custo

■ Desvantagens

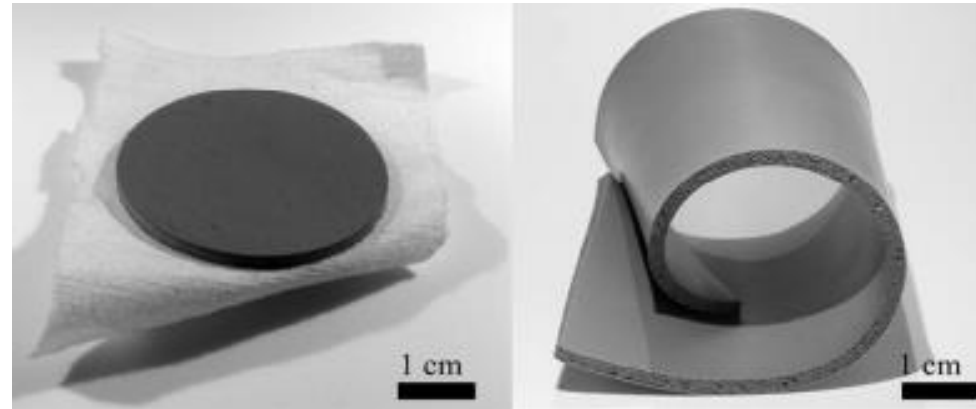
- Tempo de vida curto (em prateleira e em utilização)
- Requer preparação da pele
- Adesão à pele



ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-IV)

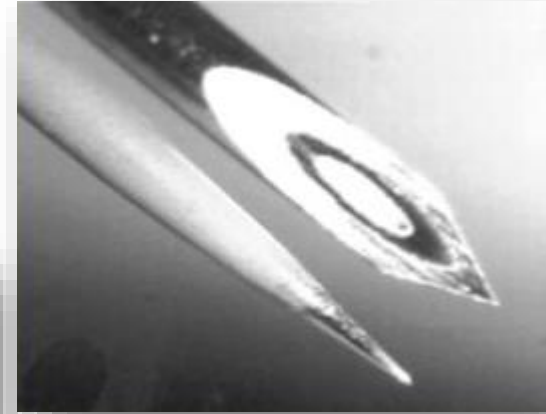
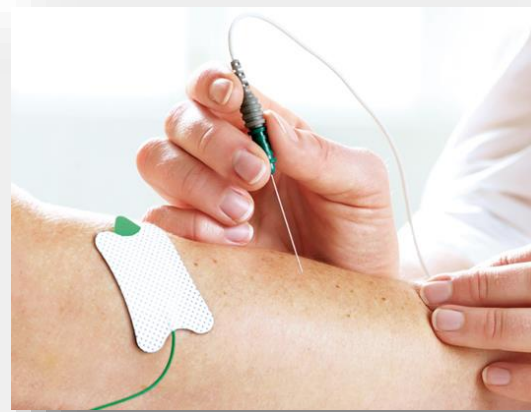
■ Eléctrodos de Fléxiveis

- A superfície corporal não é uniforme
- Eléctrodos rígidos não efectuam a ligação mais conformal
- Relevantes para crianças



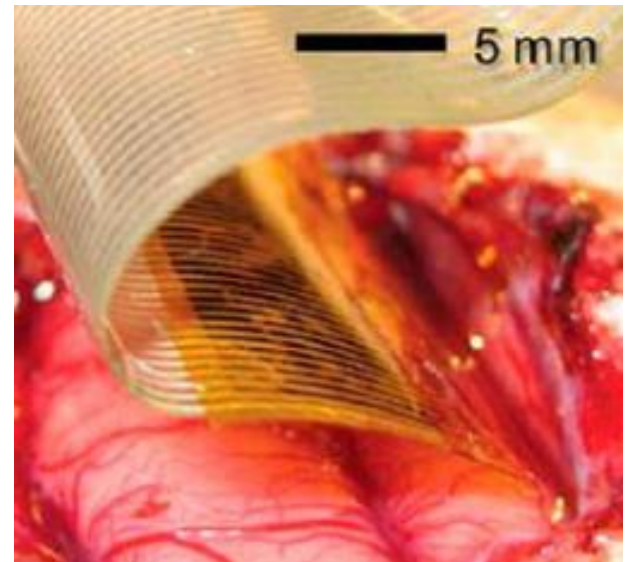
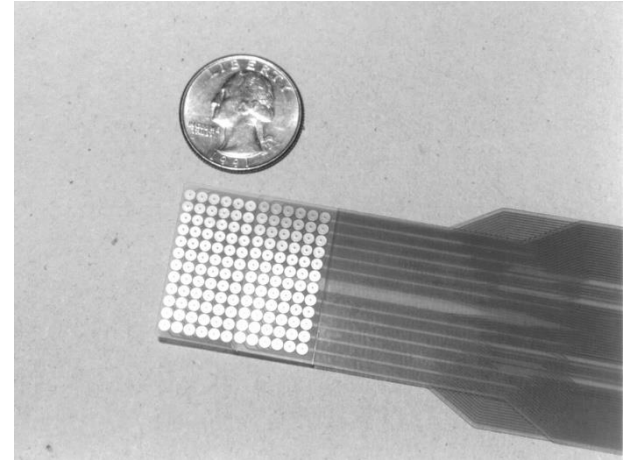
ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-V)

- **Eléctrodos Invasivos**
- Eliminação da interface eléctrodo-pele
- Aumento da selectividade



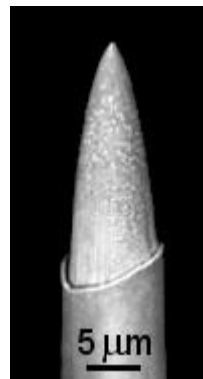
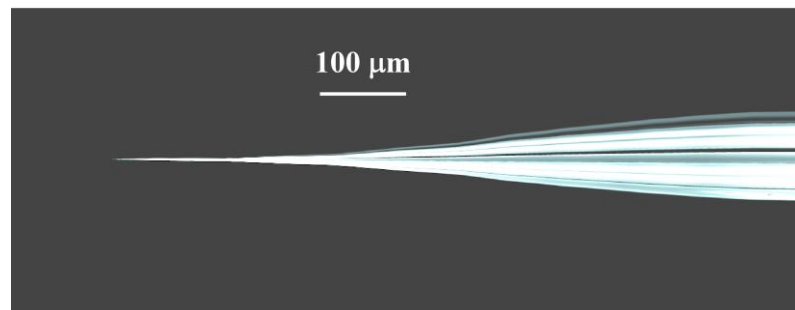
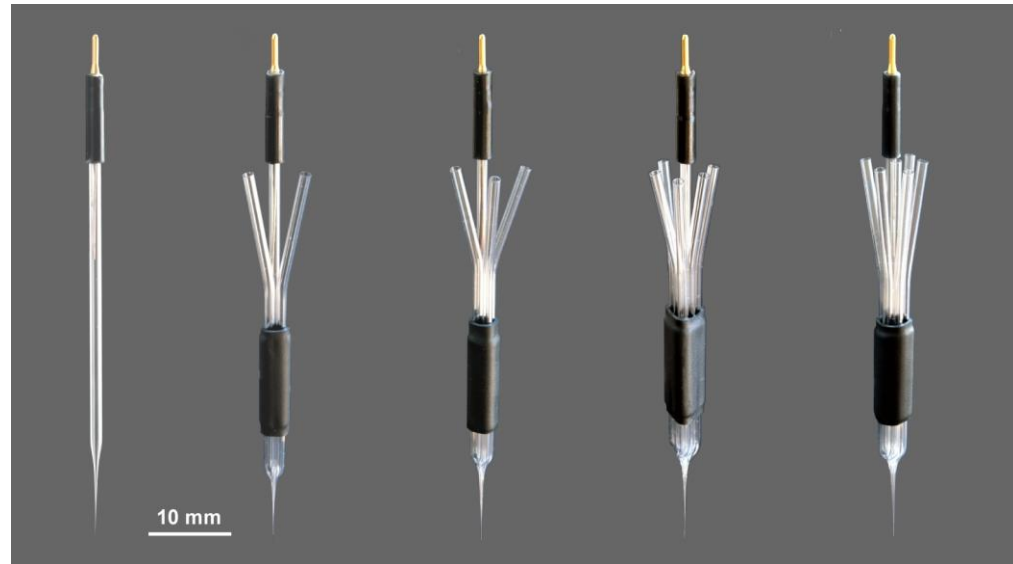
ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-VI)

- Arrays de Eléctrodos
- Garantem disposição espacial fixa
- Permitem mapeamento

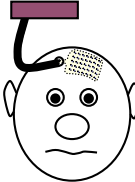
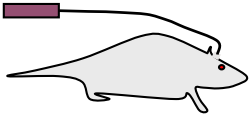
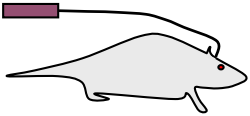
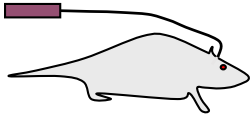
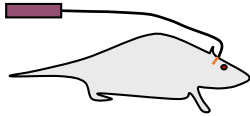
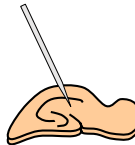
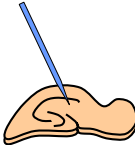
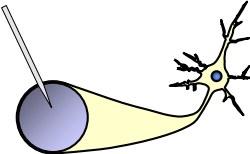
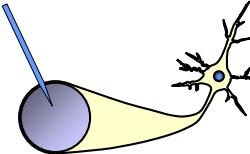


ELÉCTRODOS (EXEMPLOS-VII)

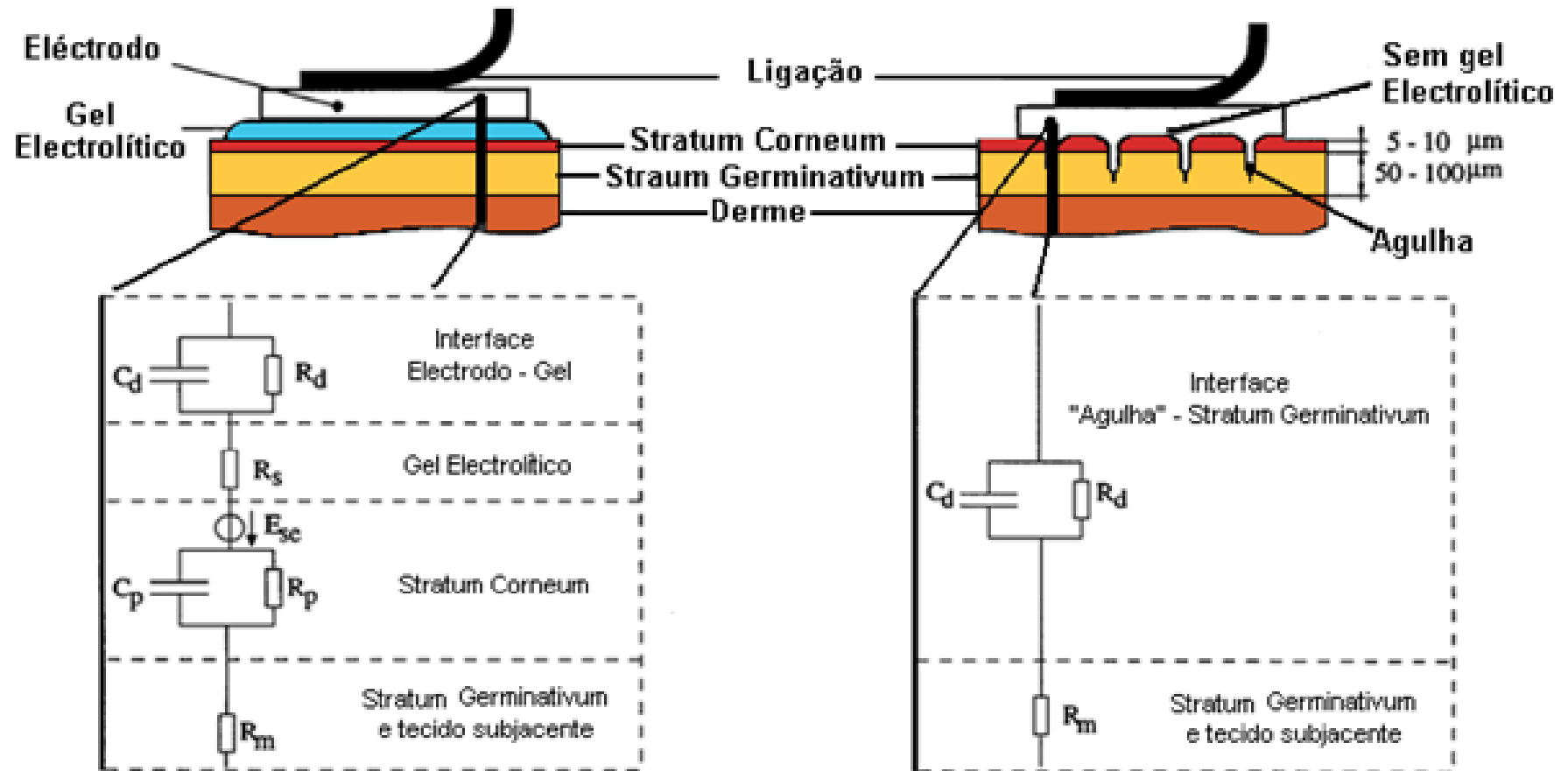
- **Microeléctrodos**
- Medição de potenciais de membrana
 - Pequeno suficiente para ser colocado a nível celular
 - Robusto para penetrar na membrana
 - Dimensões da ponta: 0.05-10 μm
- Minimização do trauma nos tecidos
- Contacto mais selectivo
- Planares ou 3D



TIPOS DE ELÉCTRODOS

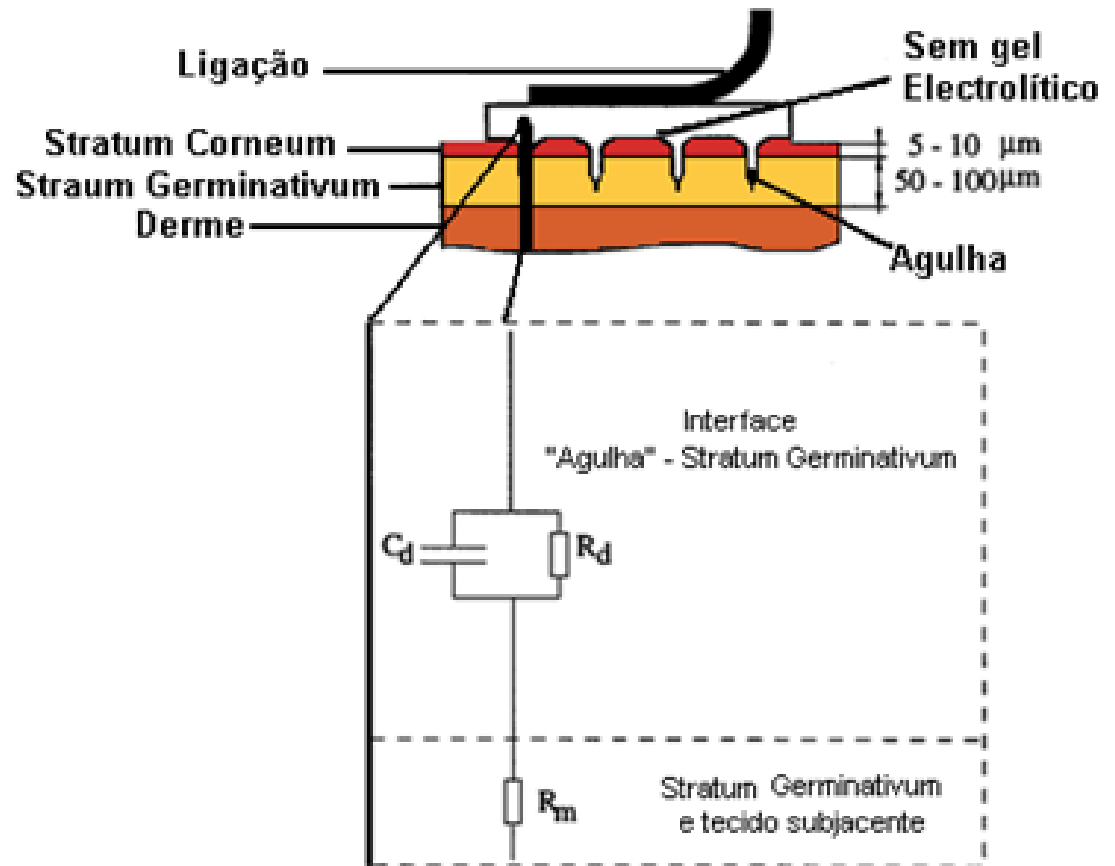
	Eléctrodos Externos	Eléctrodos sub-durais	Micro-Eléctrodos	Micro-sensores	
Humano				—	Aplicações <i>In vivo</i>
Animal					
Tecido fatias	—	—			Aplicações <i>In vitro</i>
Celular	—	—			

ELÉCTRODO CONVENCIONAL VS SECO



ELÉCTRODO CONVENCIONAL VS SECO

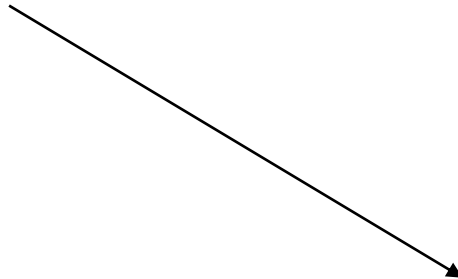
- A superfície condutora nas estruturas pontiagudas está em contacto directo com a camada germinativa
- resulta apenas a interface electrodo-electrólito
- R_m representa a resistividade da camada germinativa e subjacente.



FABRICO DE ELÉCTRODOS

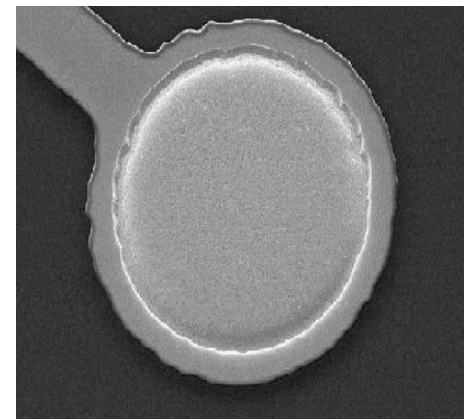
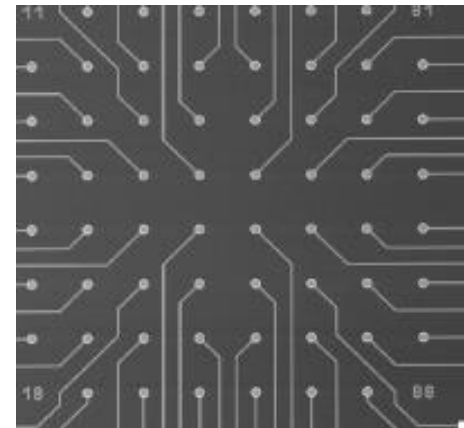
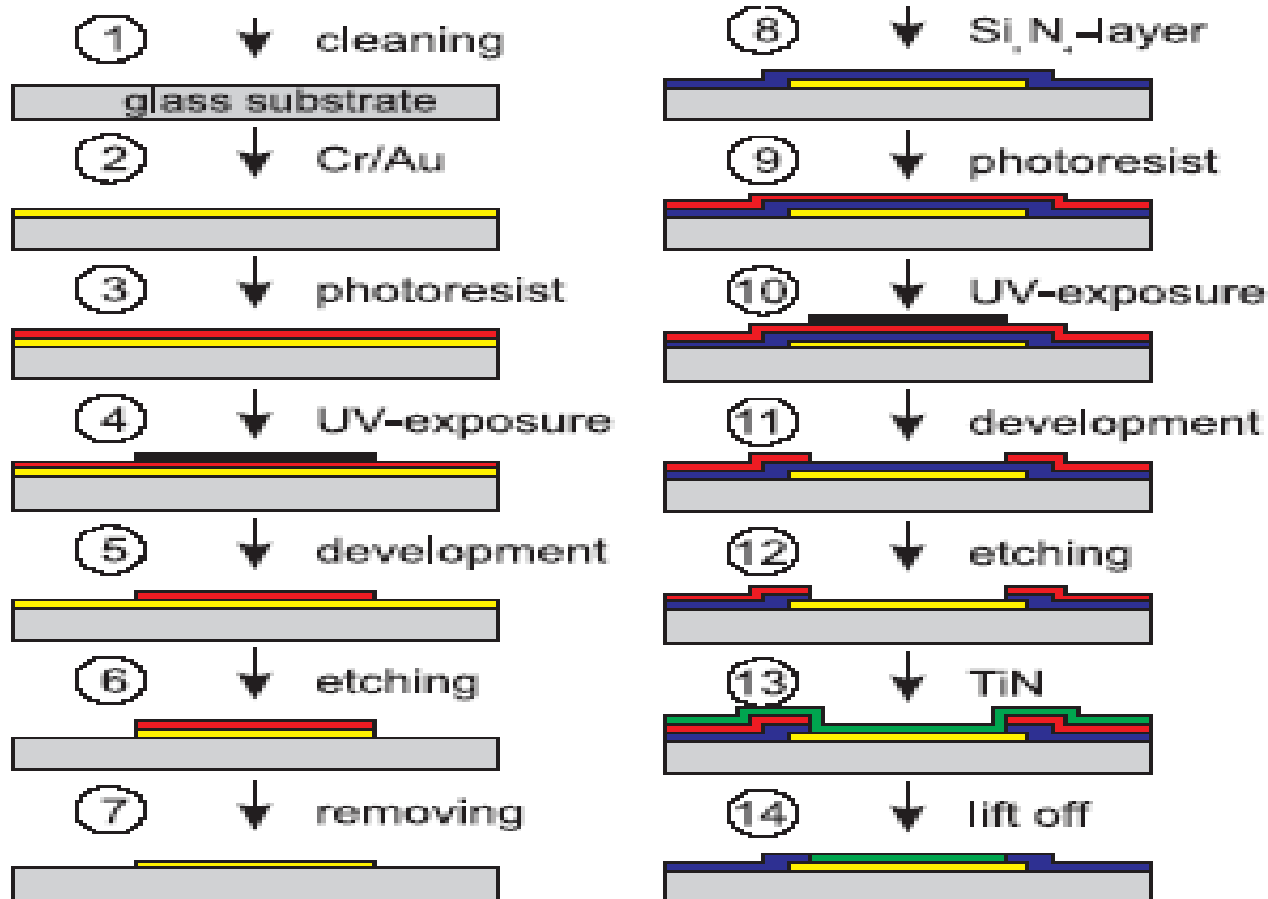
MICROTECNOLOGIAS

- Processos de PVD e CVD
- Padronização/Litografia
- Corrosão química e física
- Processos de corte
- Micromaquinagem



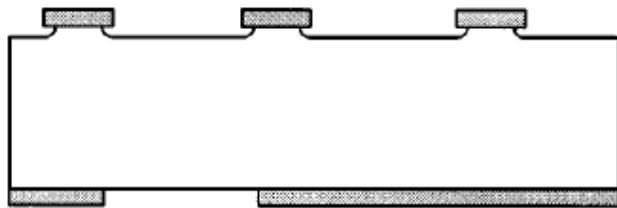
- Estruturas complexas
- Dimensões reduzidas
- Alto desempenho eléctrico
- Soluções integradas

EXEMPLO - PLANAR

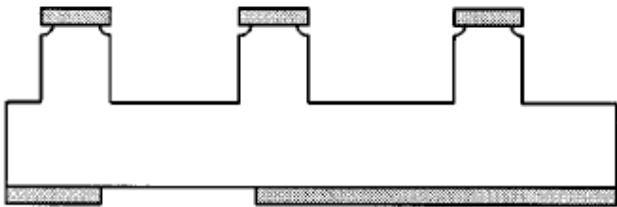


EXEMPLO - TRIDIMENSIONAL

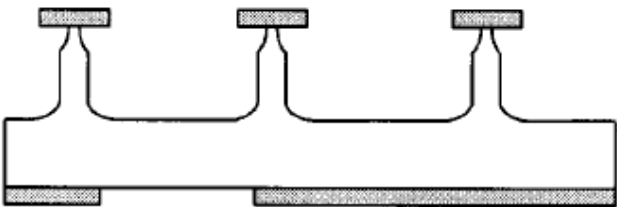
Silver
 Siliconoxide
 Silicon



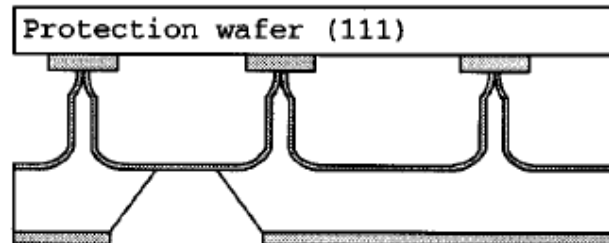
(a) First isotropic etch



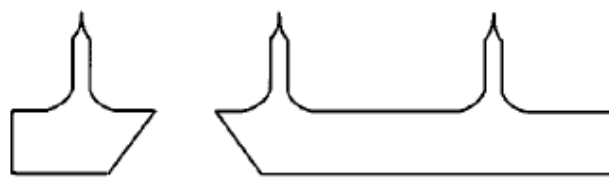
(b) Anisotropic etch



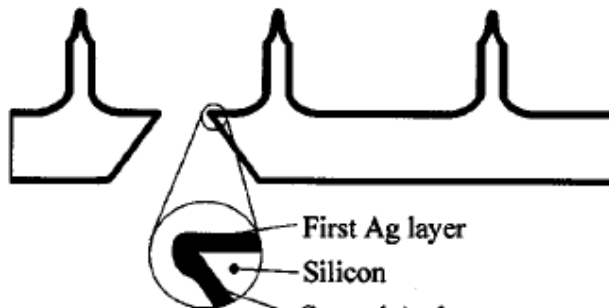
(c) Second isotropic etch



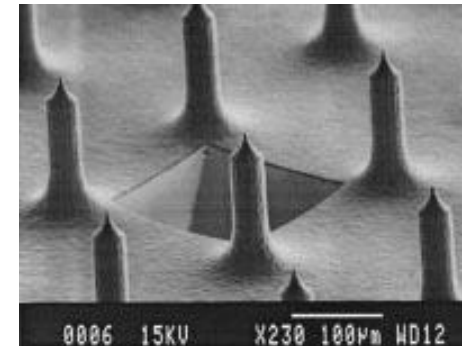
(d) Through-hole KOH-etch



(e) Oxide strip (spike sharpening)



(f) Silver (Ag) coating



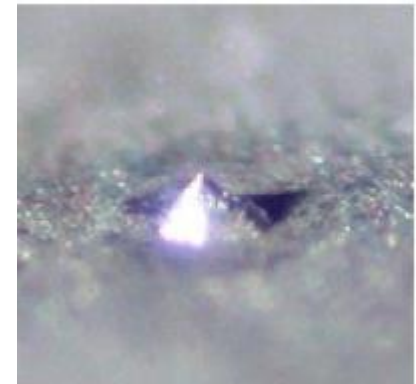
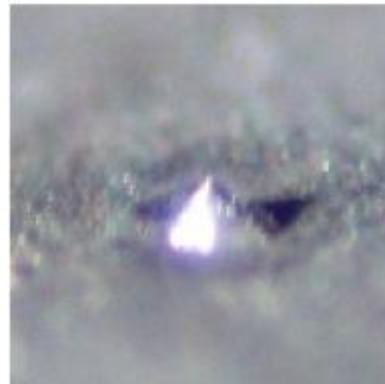
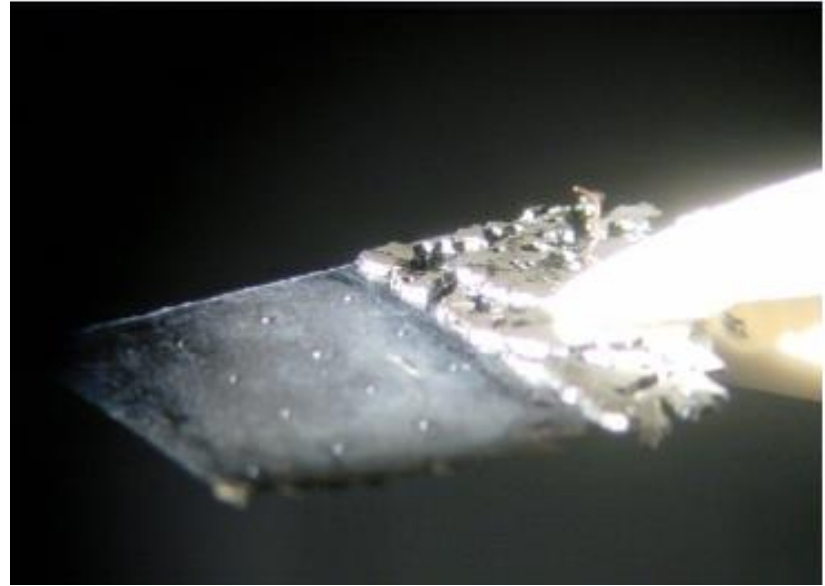
MICROELÉCTRODOS @ DEI

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

- Microelectrodo Tridimensional
- Baseado em *etching* de silício
- Efeito *underetch*

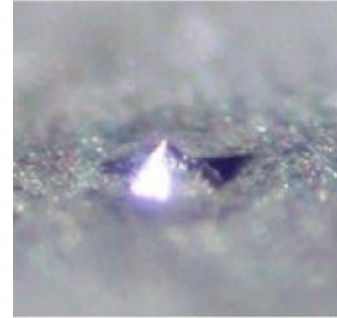
Como o produziram?



EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



Wafer Silício



wafer de Silício orientação $\langle 100 \rangle$

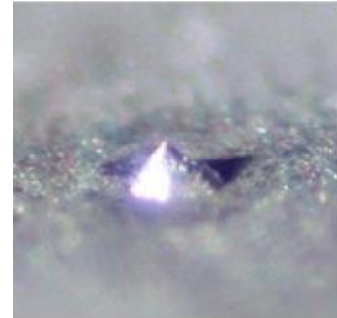
EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



Wafer Silício



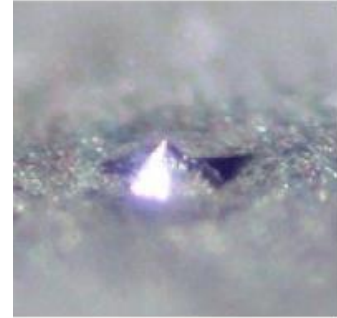
Camada de Protecção



Deposição de filme fino de camada de Protecção (ex. Crómio)

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

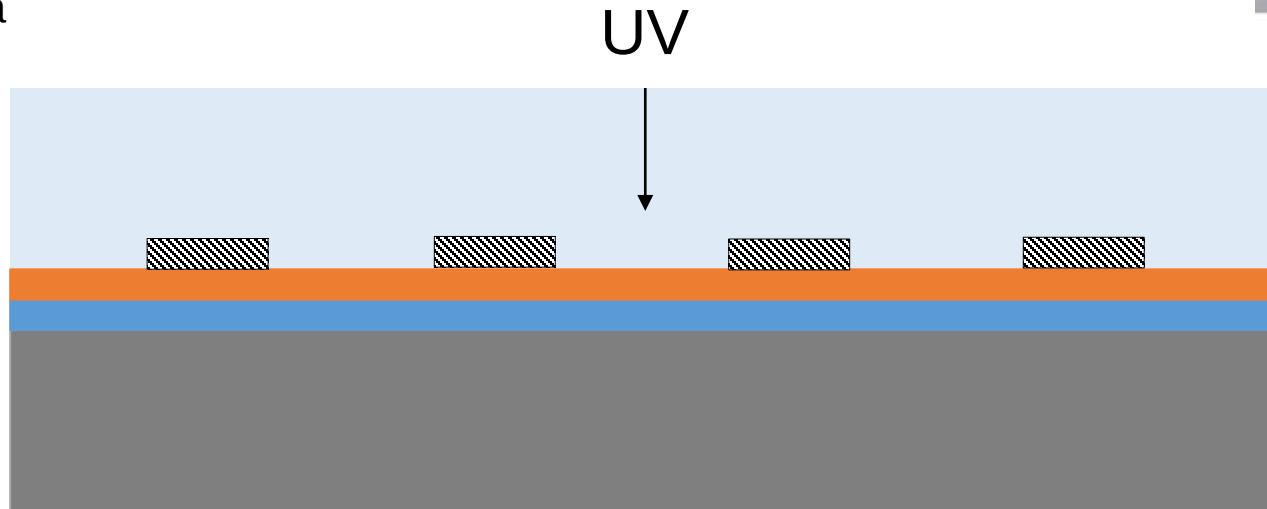
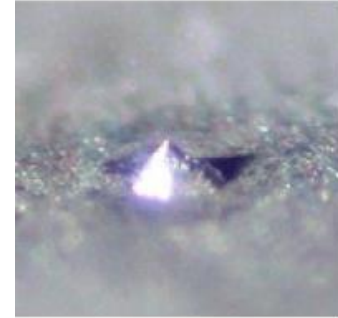
-  Wafer Silício
-  Camada de Protecção
-  Photoresist



Deposição de *photoresist*

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

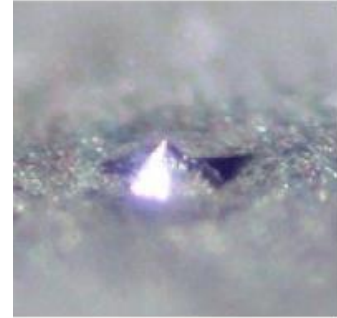
-  Wafer Silício
-  Camada de Protecção
-  Photoresist
-  Máscara



Exposição do photoresist (máscara negativa)

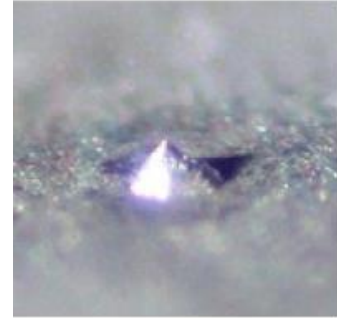
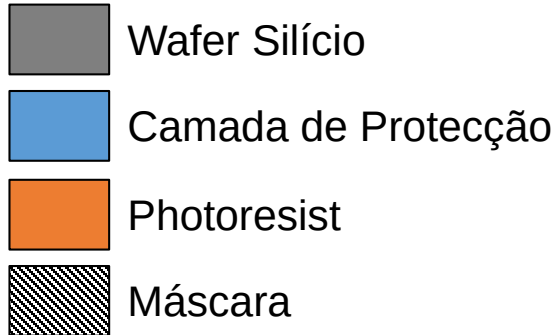
EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

-  Wafer Silício
-  Camada de Protecção
-  Photoresist
-  Máscara



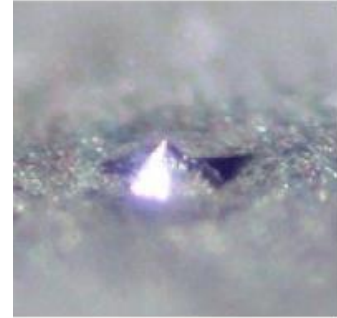
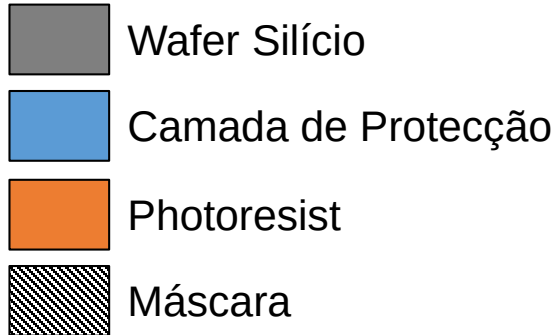
Developing do photoresist

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



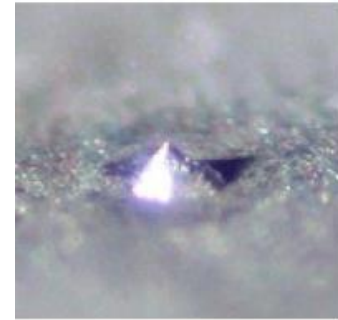
Etching do Crómio

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



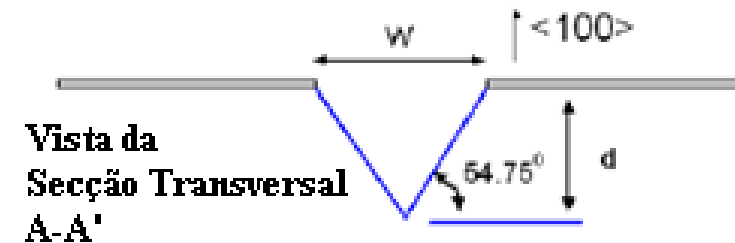
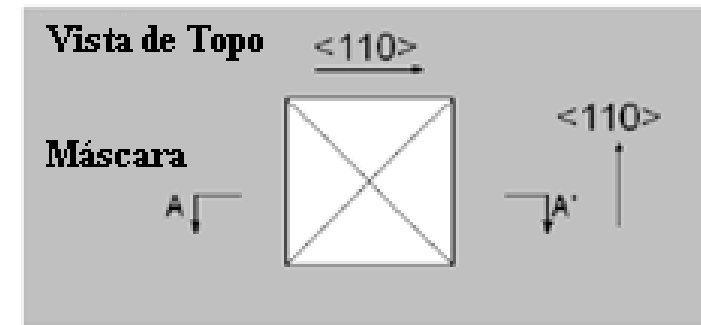
Remoção do Photoresist

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



Etching do Silício

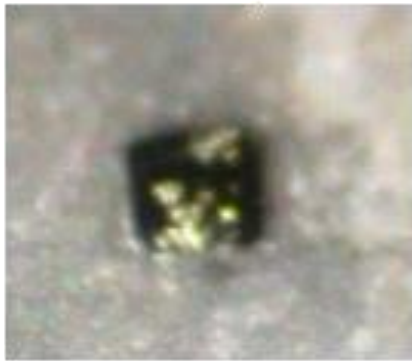
EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO



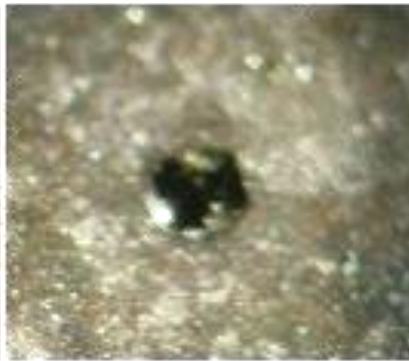
Remoção do Crómio

EXEMPLO #1 - MAQUINAGEM DE SILÍCIO

■ Exemplo I



30 min



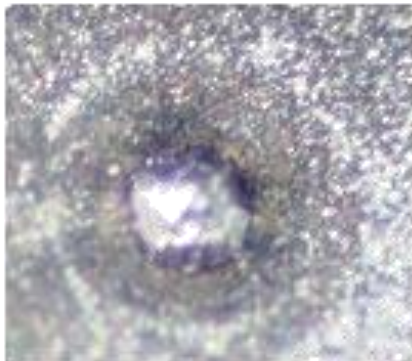
60 min



90 min



120 min



150 min



180 min



210 min

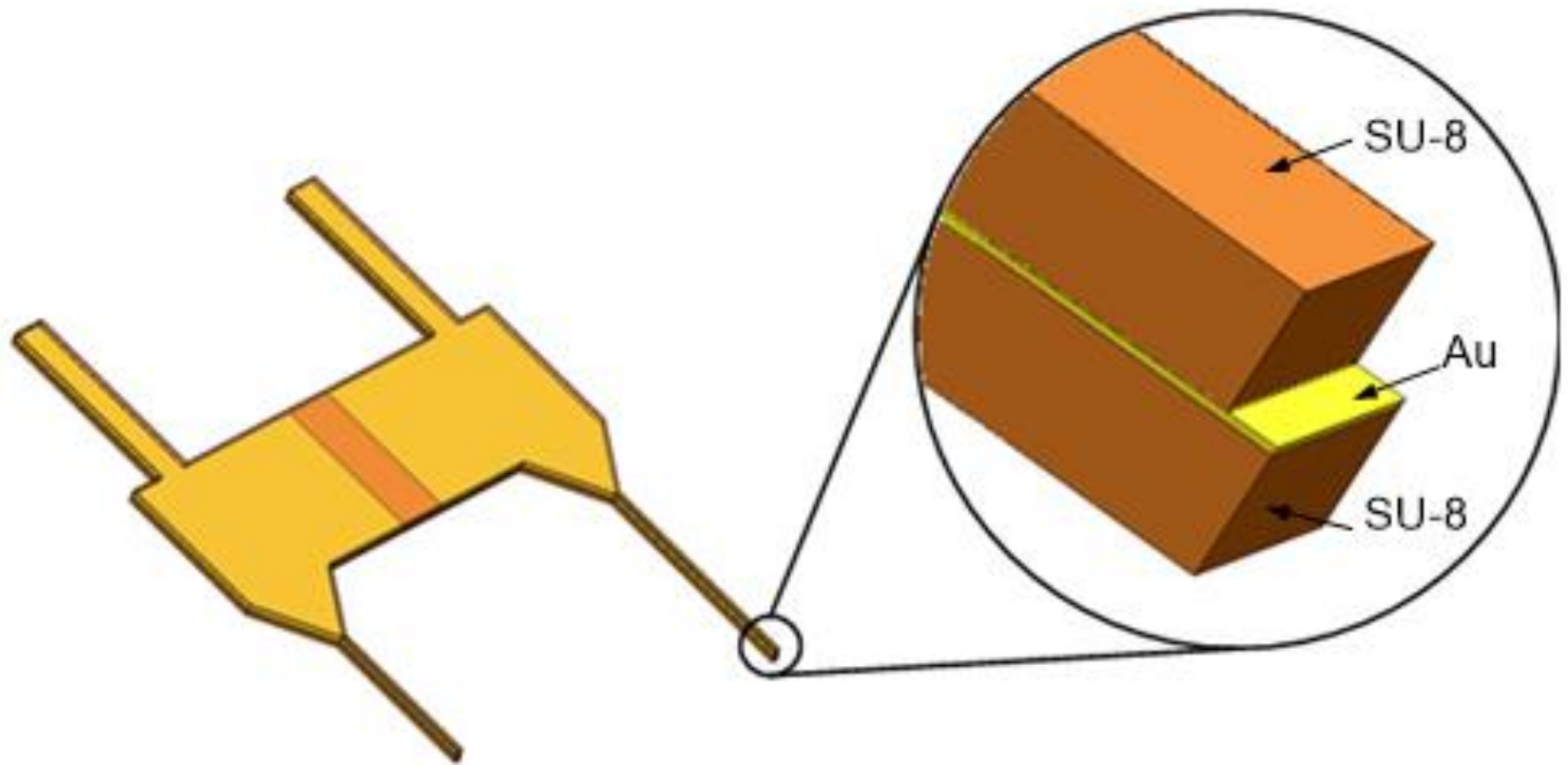


240 min

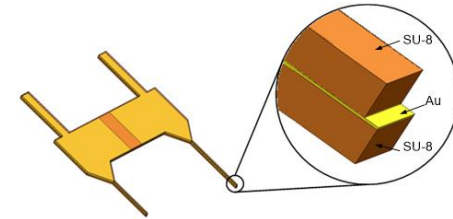
MICROELÉCTRODOS @ DEI

EXEMPLO #2 – CONSTRUÇÃO PLANAR EM SU-8

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



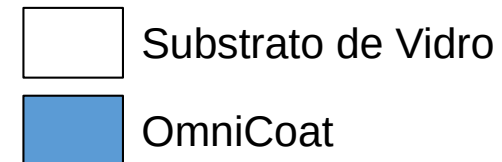
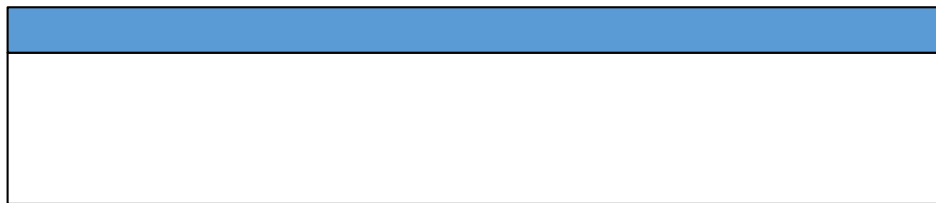
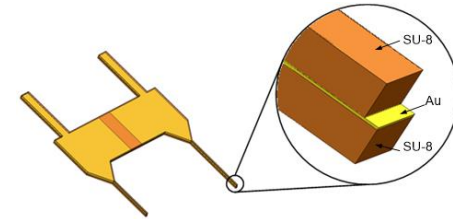
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



 Substrato de Vidro

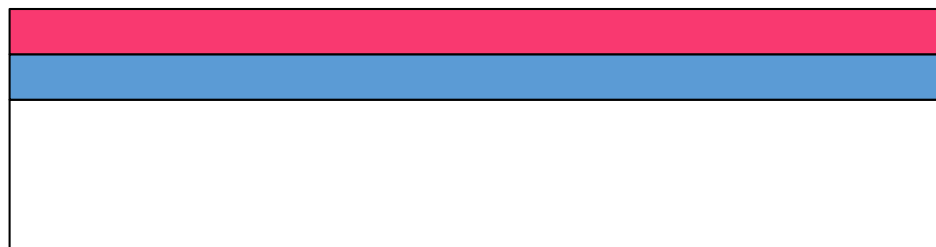
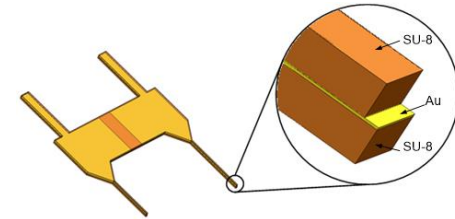


EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Coating com OmniCoat

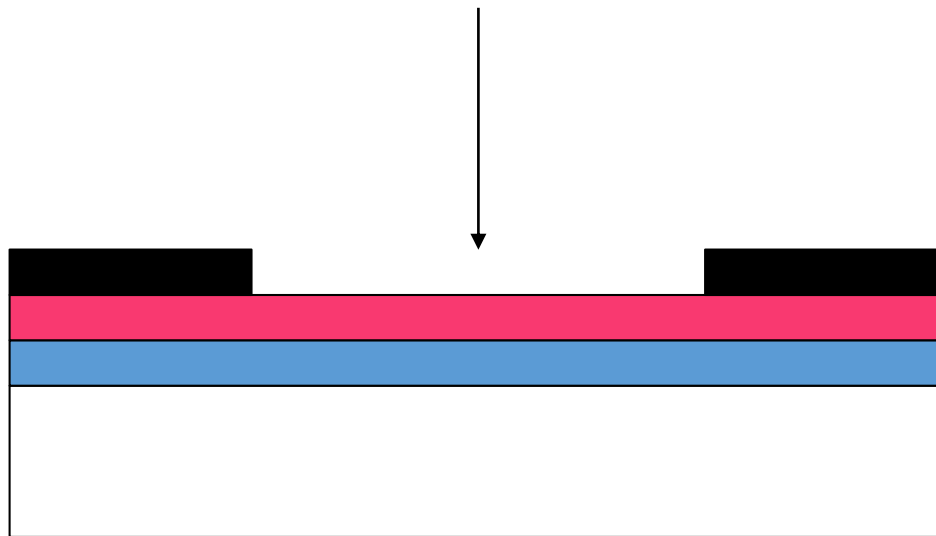
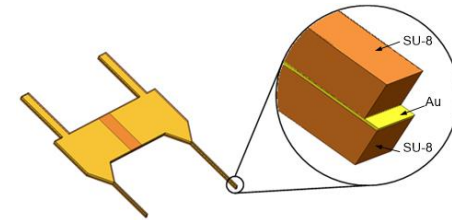
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Spin-Coating de SU-8 (150 μm)

-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto

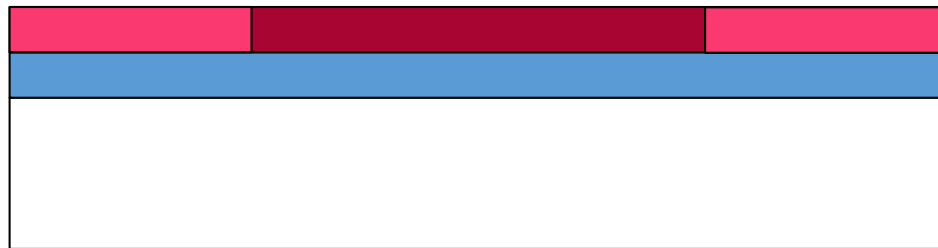
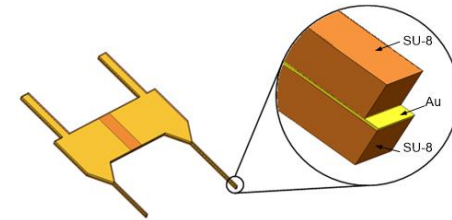
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Soft-baking e Exposição UV

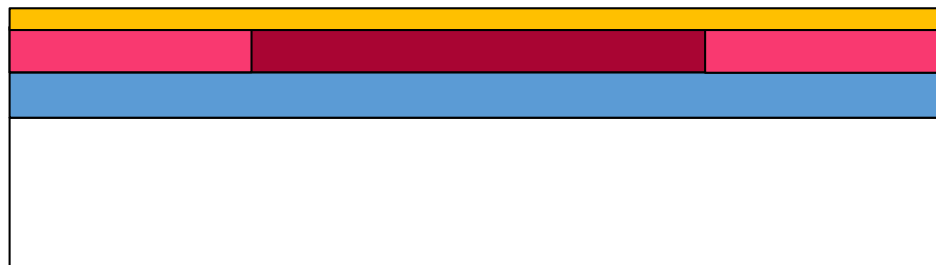
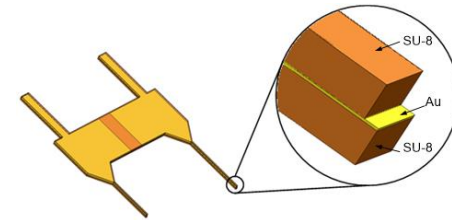
-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara
-  SU-8 Exposto

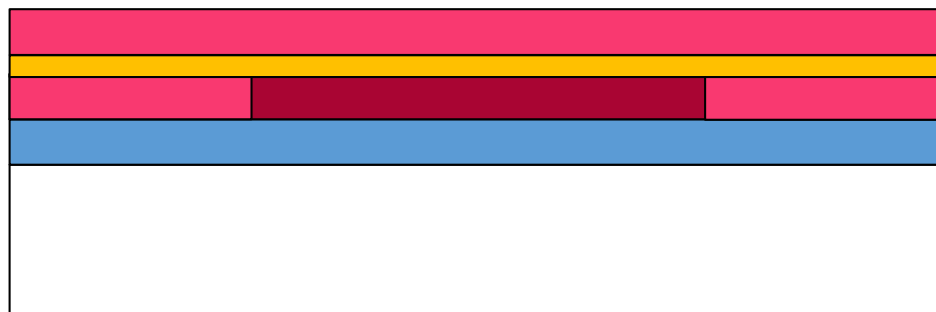
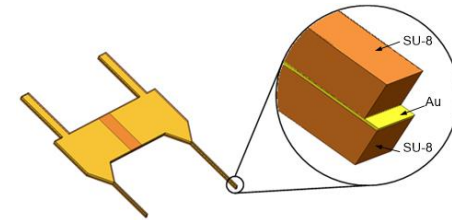
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Deposição da camada de Ouro (50 nm)

-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara
-  SU-8 Exposto
-  Ouro

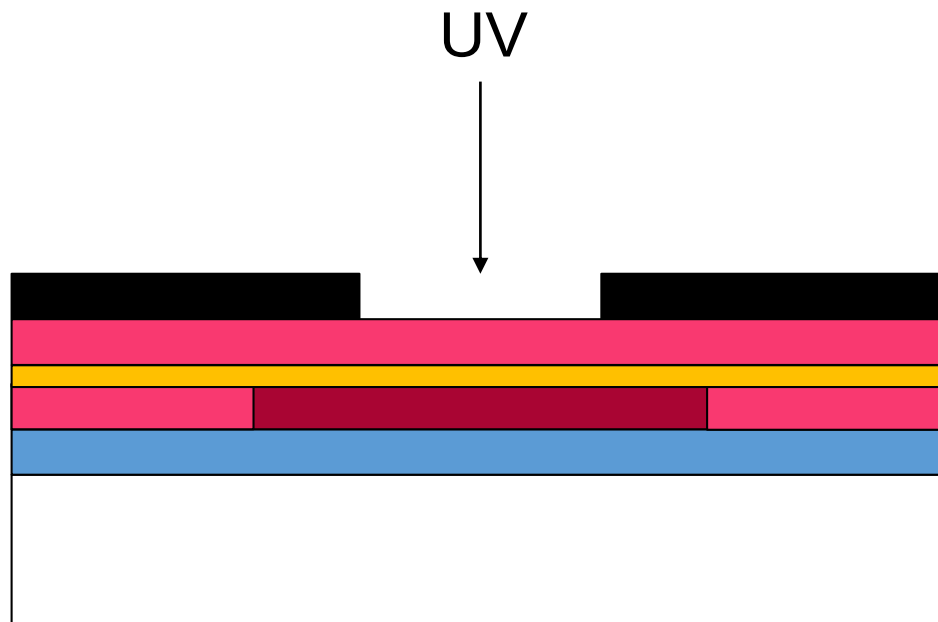
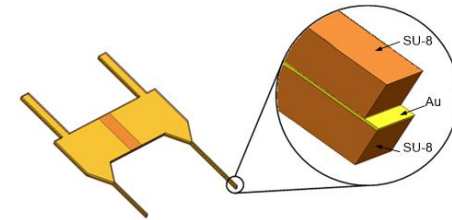
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Spin-Coating da 2ª camada de SU-8 (150 μm)



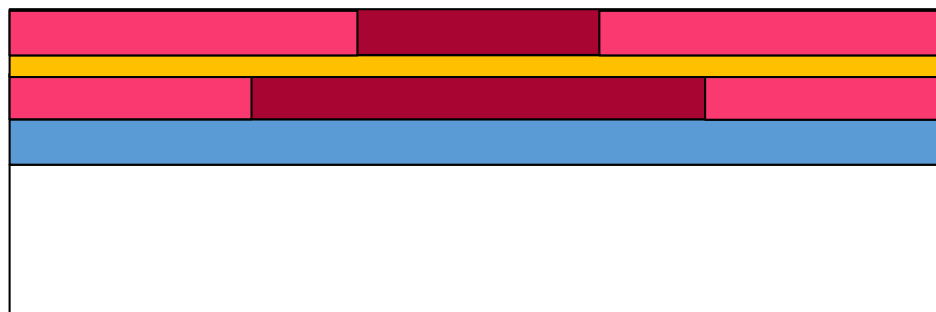
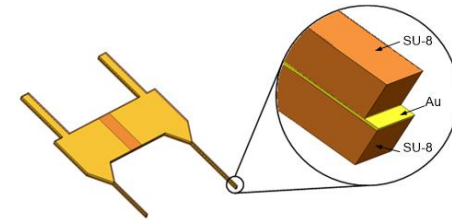
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



Soft-baking e exposição da 2ª camada de SU-8

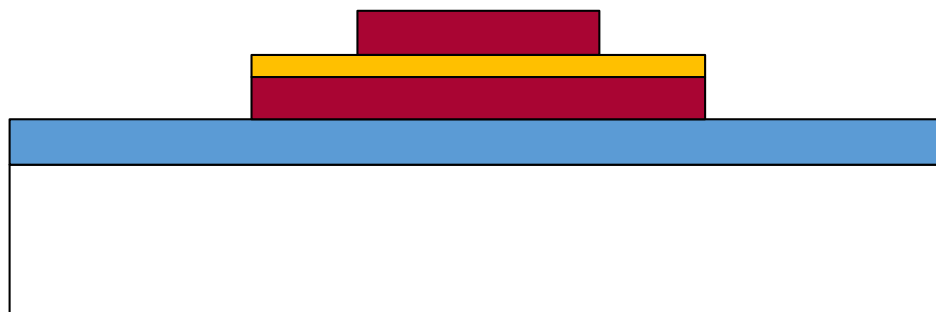
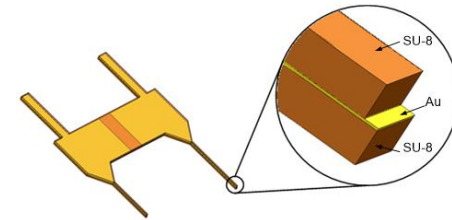
- Substrato de Vidro
- OmniCoat
- SU-8 não exposto
- Máscara
- SU-8 Exposto
- Ouro

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara
-  SU-8 Exposto
-  Ouro

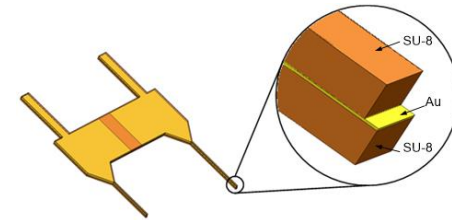
EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



SU-8 não exposto é retirado (developing)

-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara
-  SU-8 Exposto
-  Ouro

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8

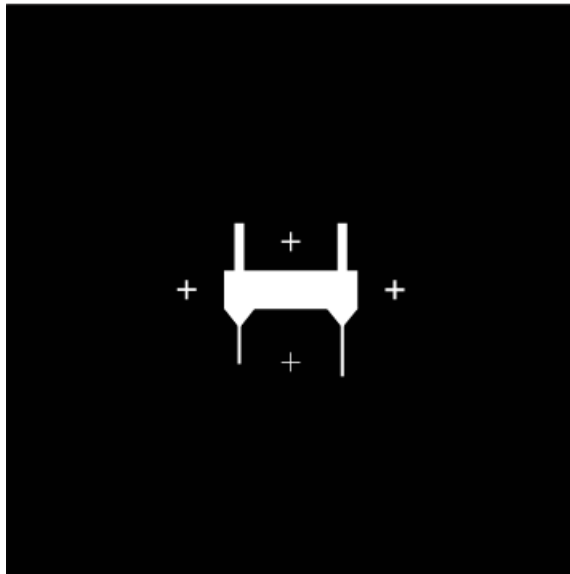


O eléctrodo é retirado do substrato de vidro

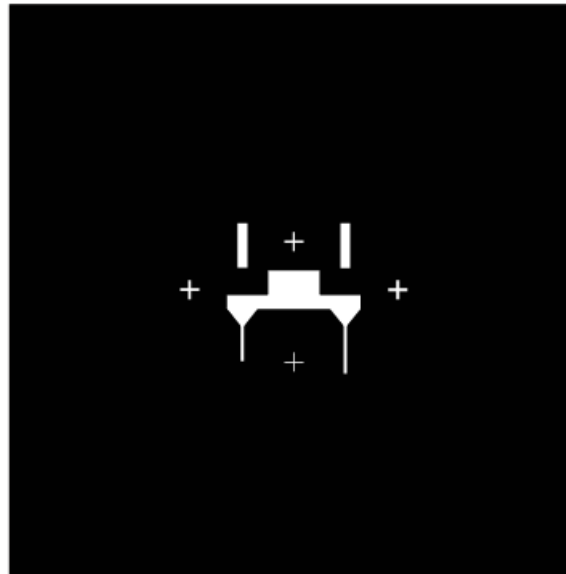
-  Substrato de Vidro
-  OmniCoat
-  SU-8 não exposto
-  Máscara
-  SU-8 Exposto
-  Ouro

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8

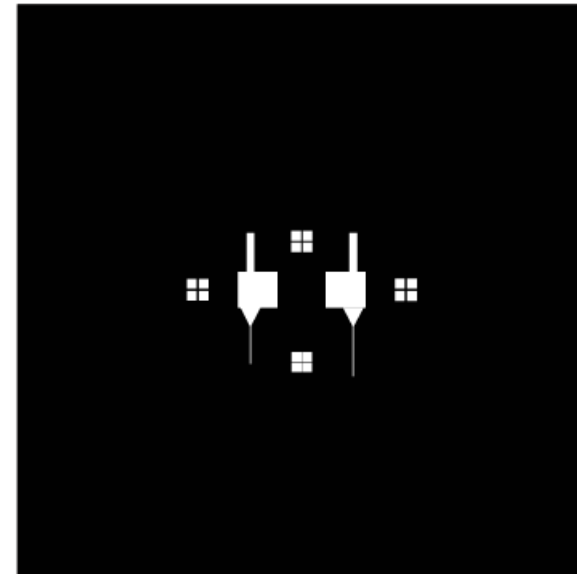
- Máscaras



Base SU-8

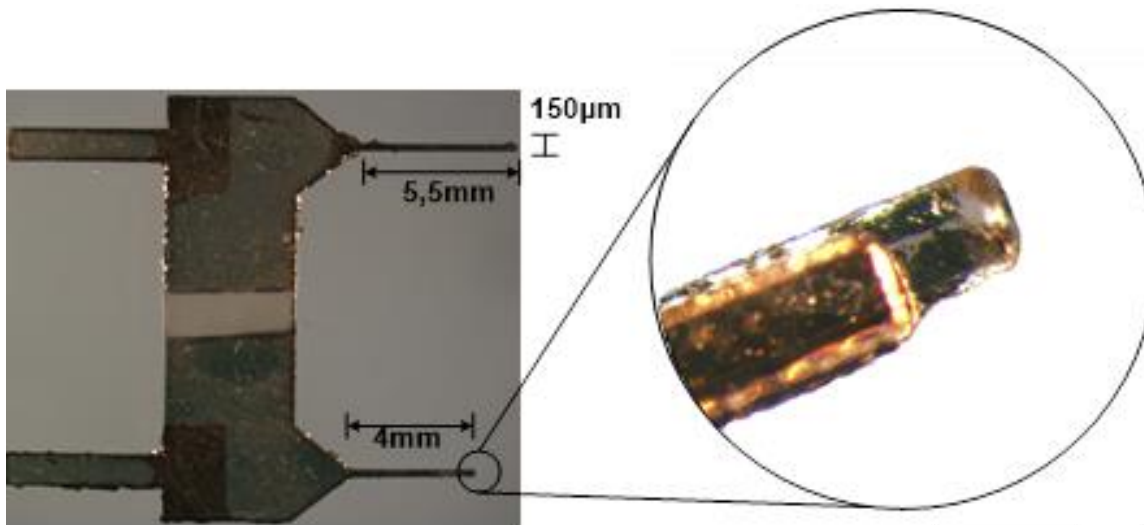


Topo SU-8



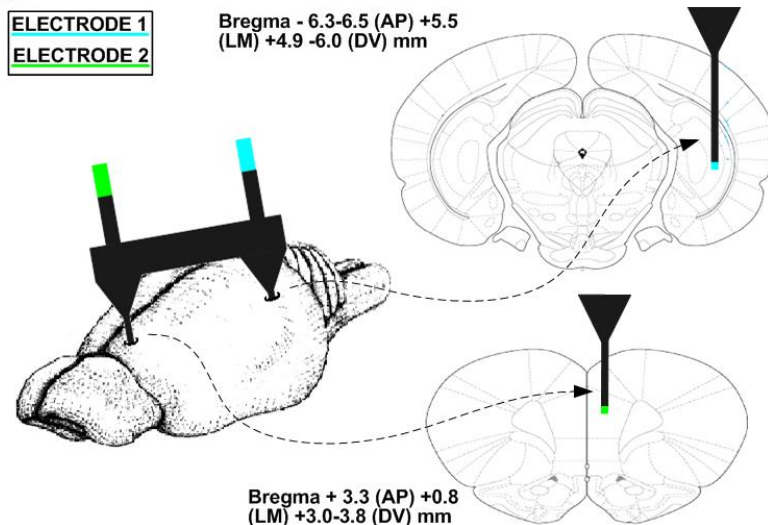
Ouro

EXEMPLO #2- CONSTRUÇÃO EM SU-8



ELECTRODE 1
ELECTRODE 2

Bregma - 6.3-6.5 (AP) +5.5
(LM) +4.9 -6.0 (DV) mm



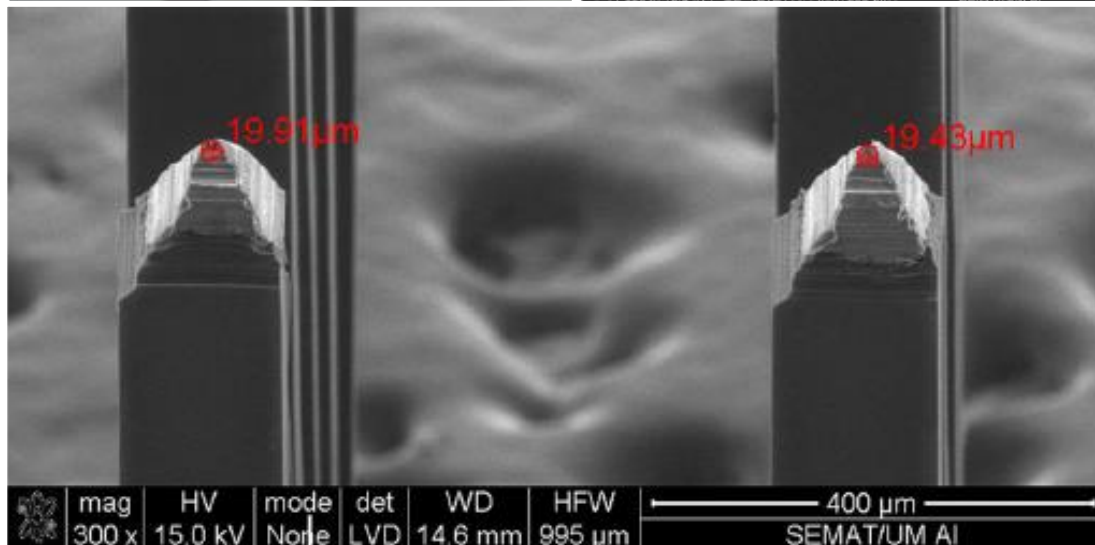
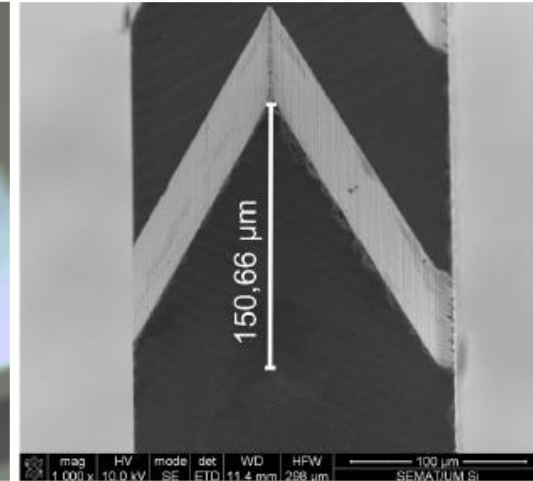
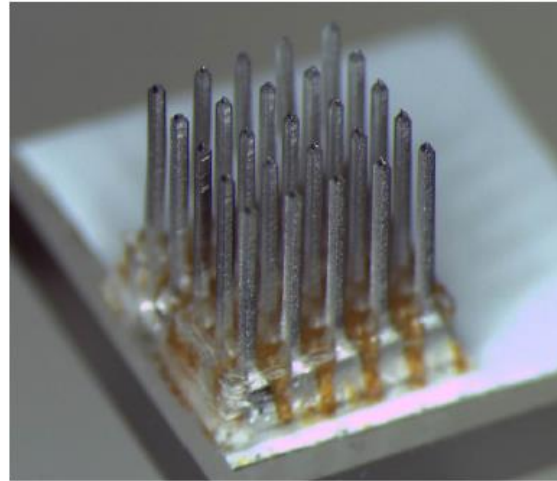
Bregma + 3.3 (AP) +0.8
(LM) +3.0-3.8 (DV) mm

MICROELÉCTRODOS @ DEI

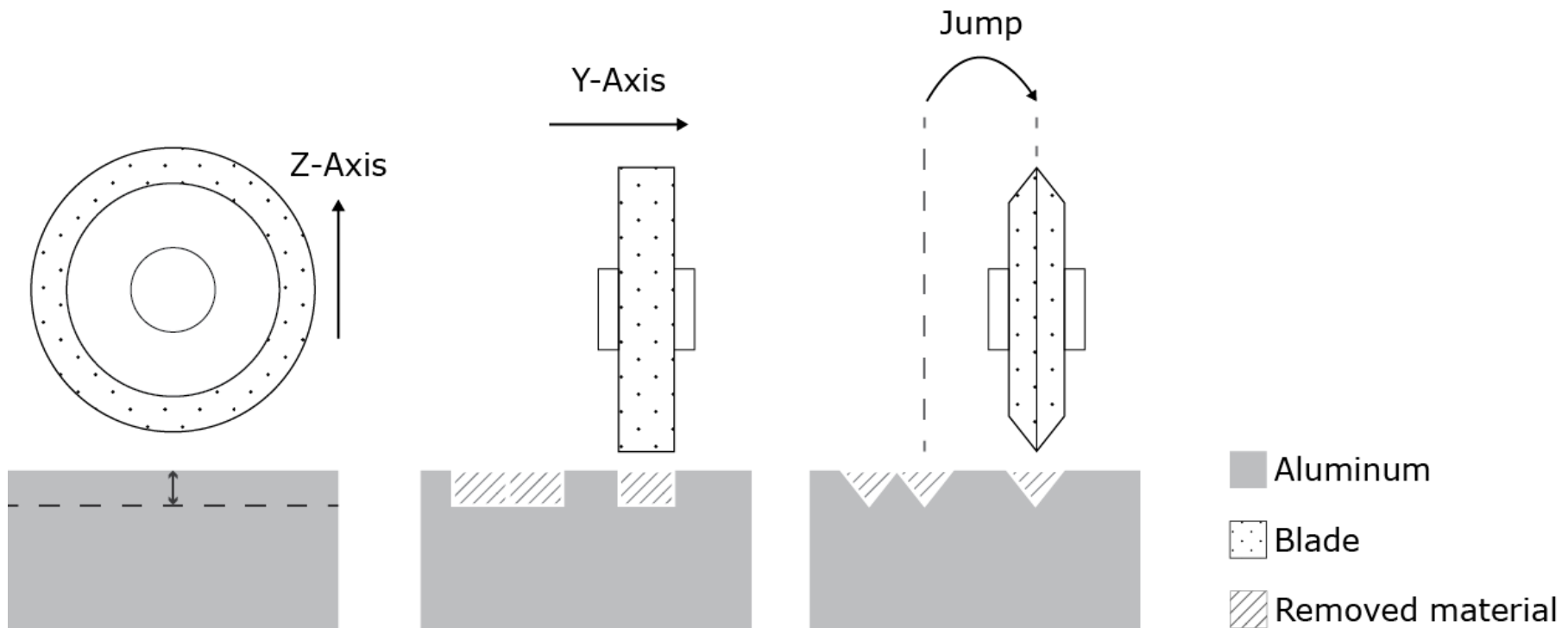
EXEMPLO #3 – MAQUINAGEM MECÂNICA

EXEMPLO #3 – MAQUINAGEM MECÂNICA

- Maquinagem através de Dicer
- Substrato em
 - Silício (exemplo #3A)
 - Alumínio (exemplo #3B)
- Altura de agulhas superiores a 3mm



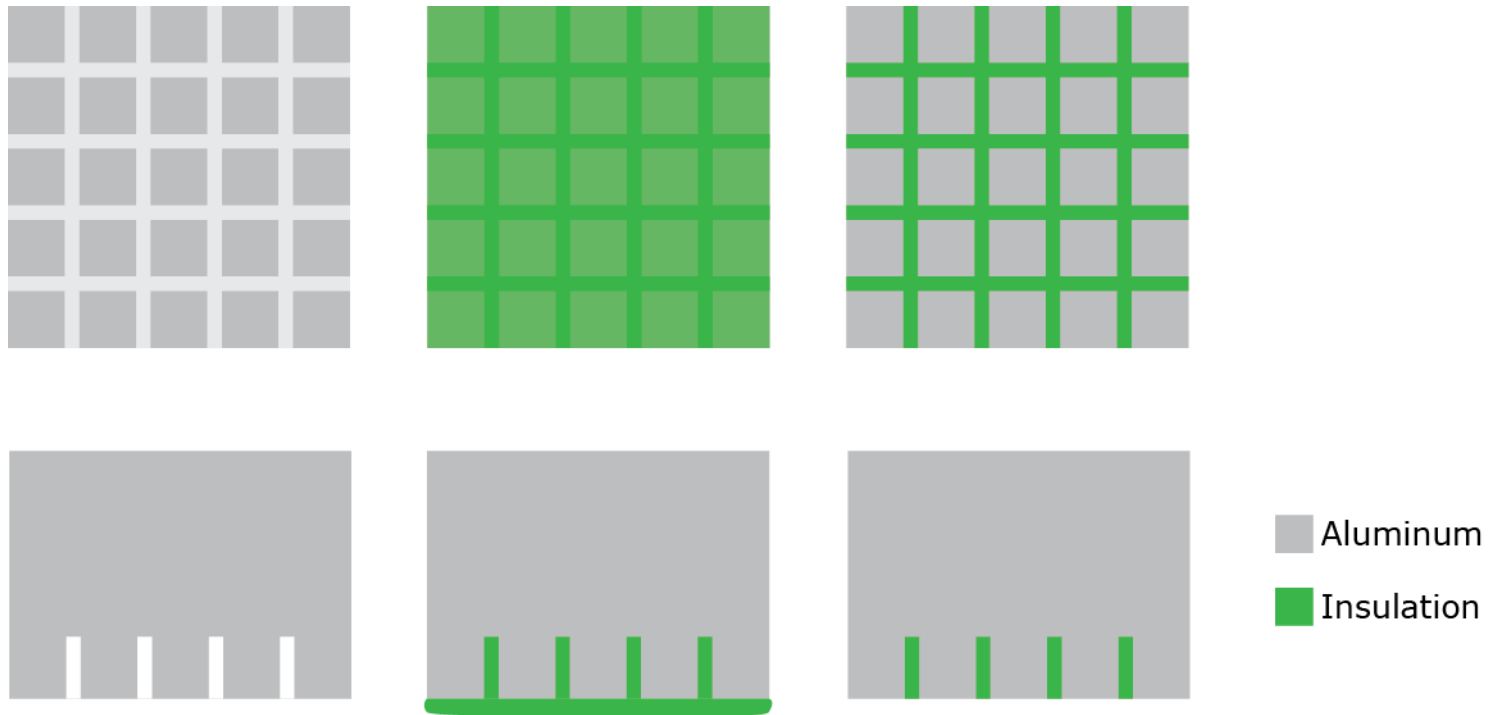
EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA



Maquinagem por Dicer

EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

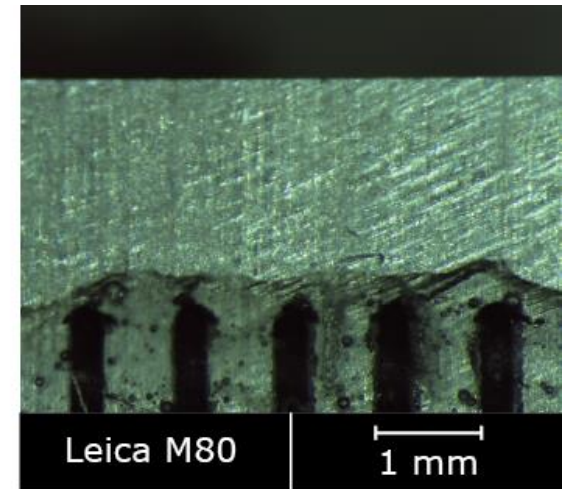
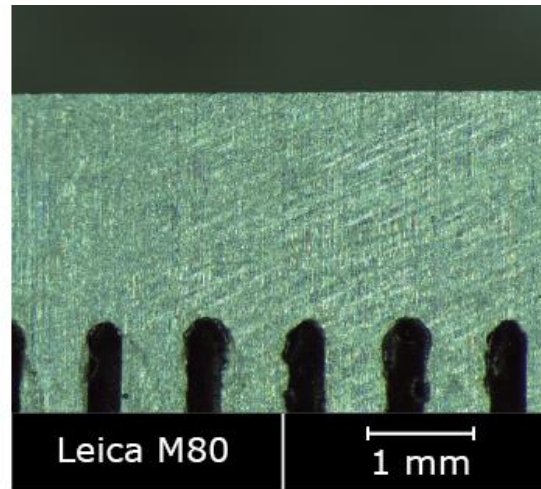
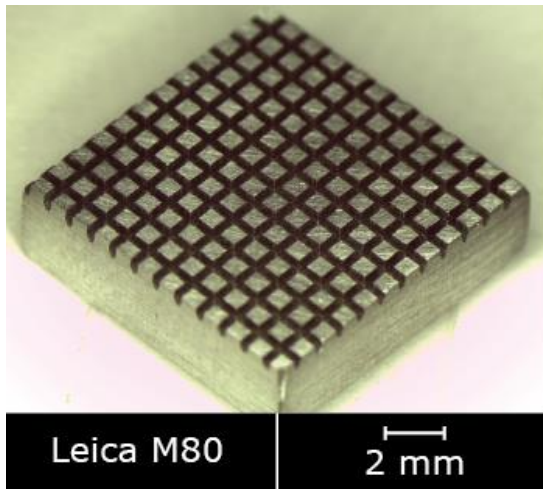
Substrato em Alumínio



Definição dos pads.

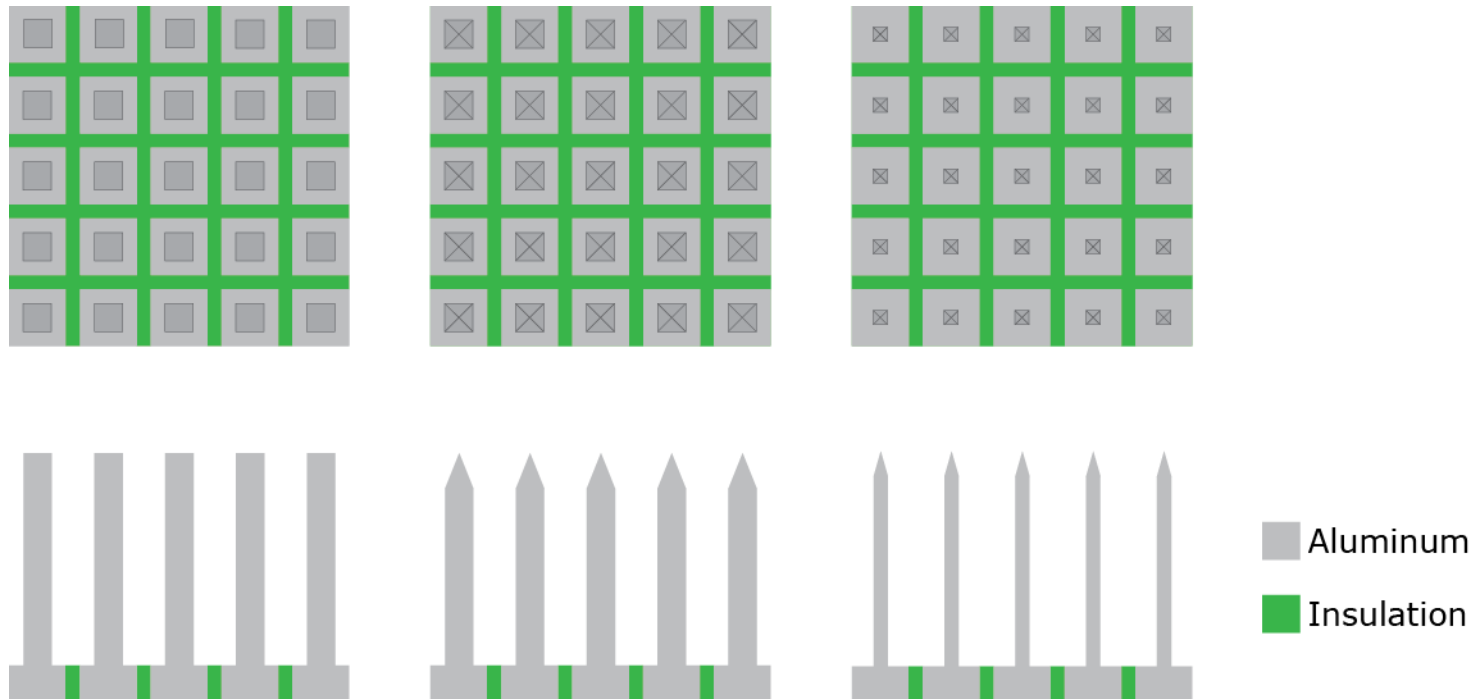
EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio



EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

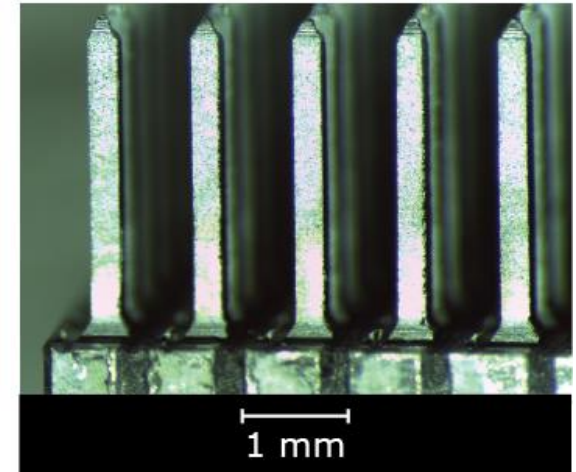
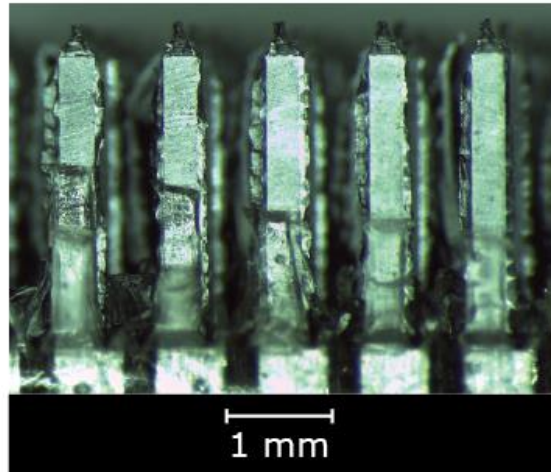
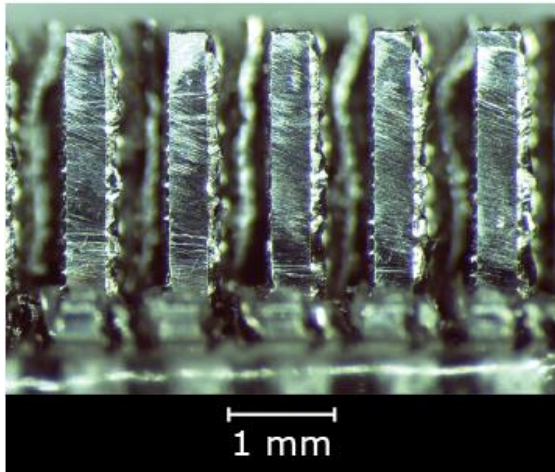
Substrato em Alumínio



Definição das agulhas e seu refinamento.

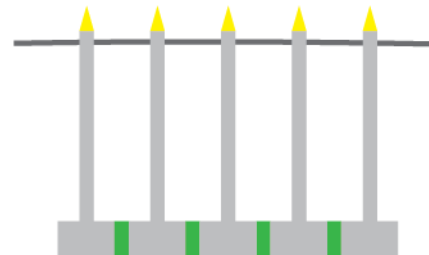
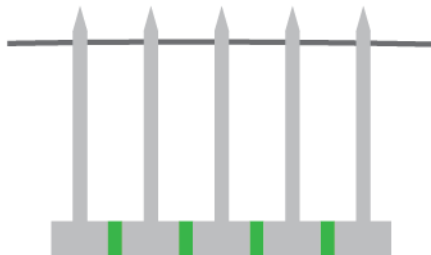
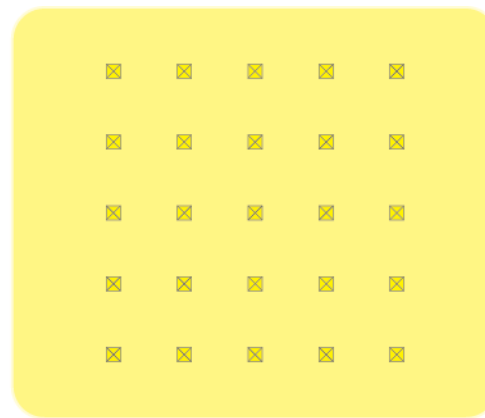
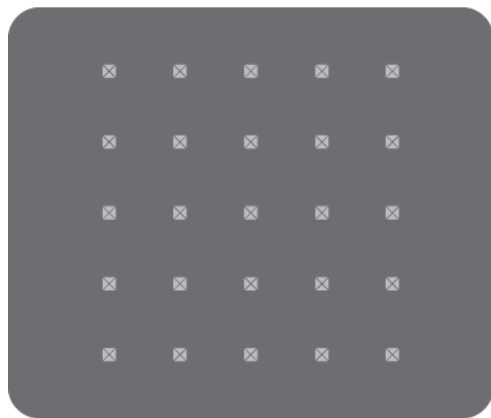
EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio



EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio

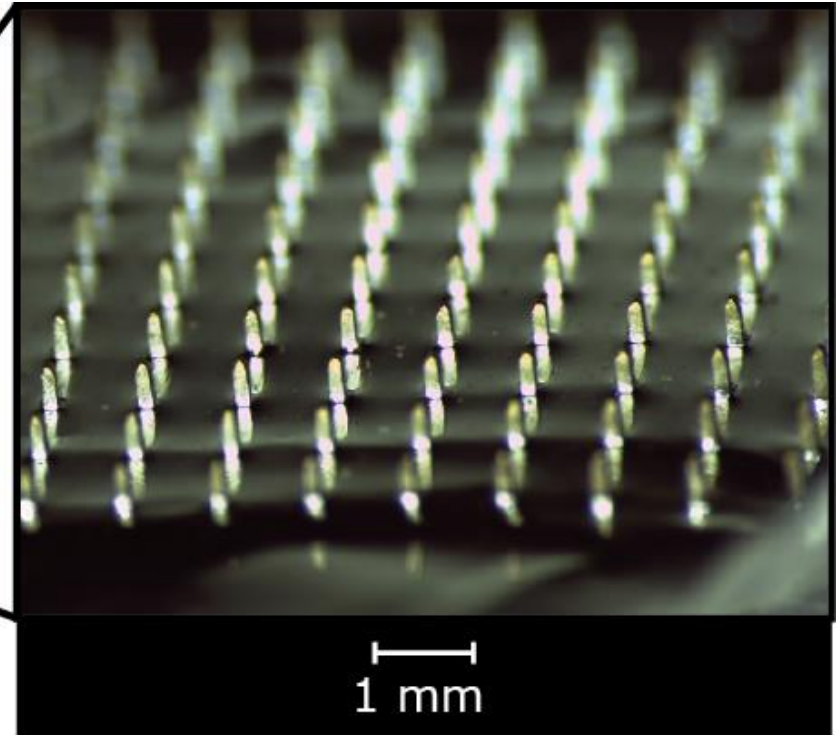
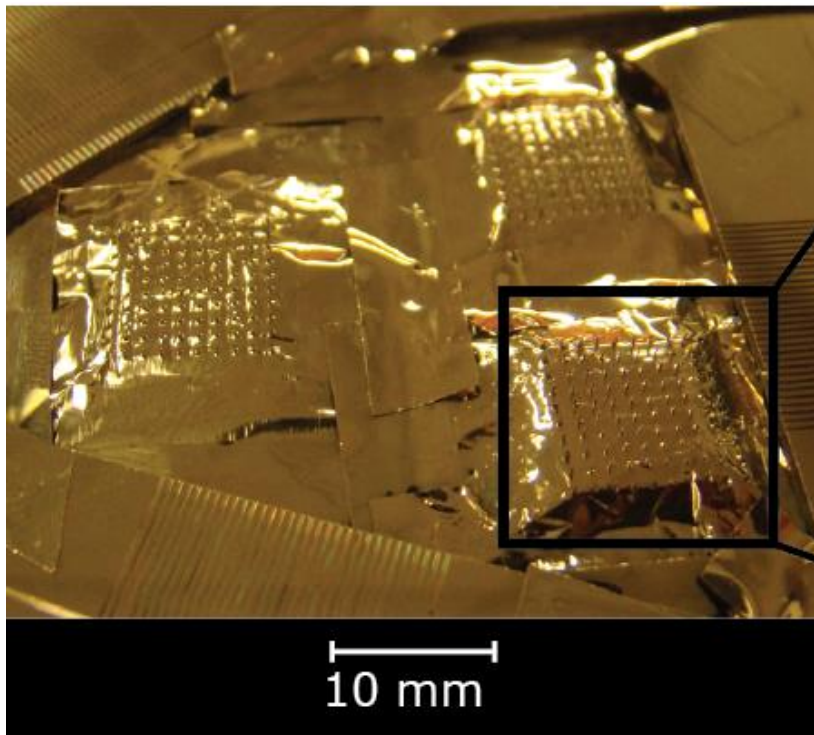


- Aluminum Foil
- Aluminum
- Insulation
- Gold

Deposição do transdutor iónico.

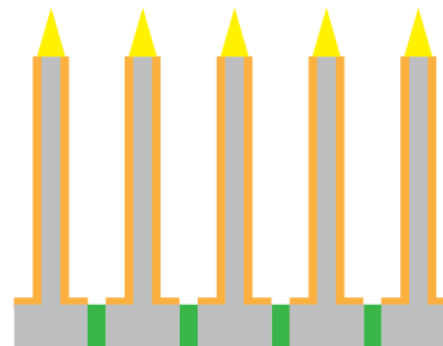
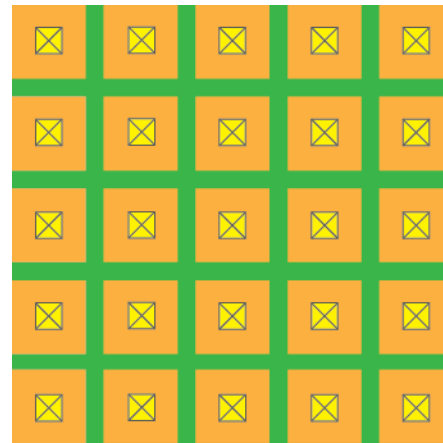
EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio



EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio

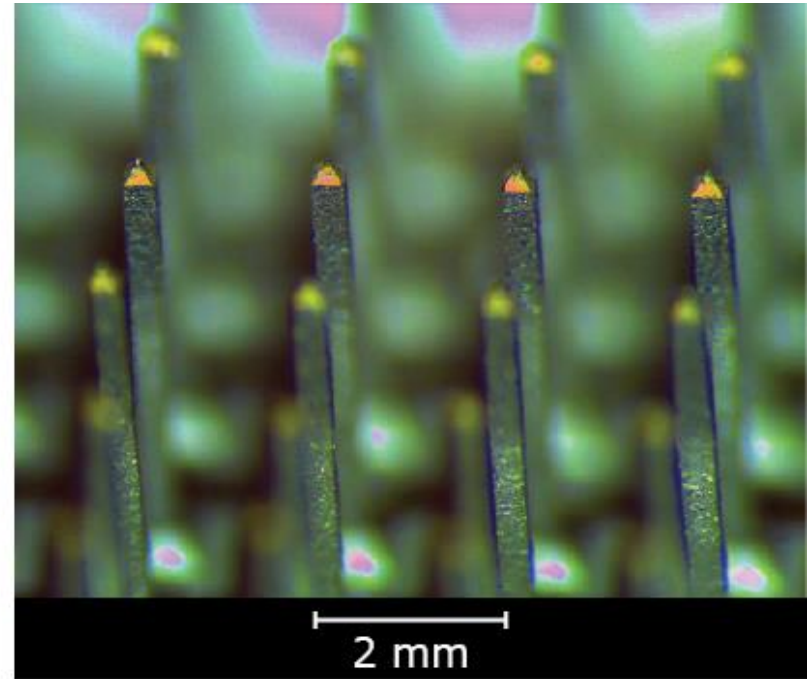
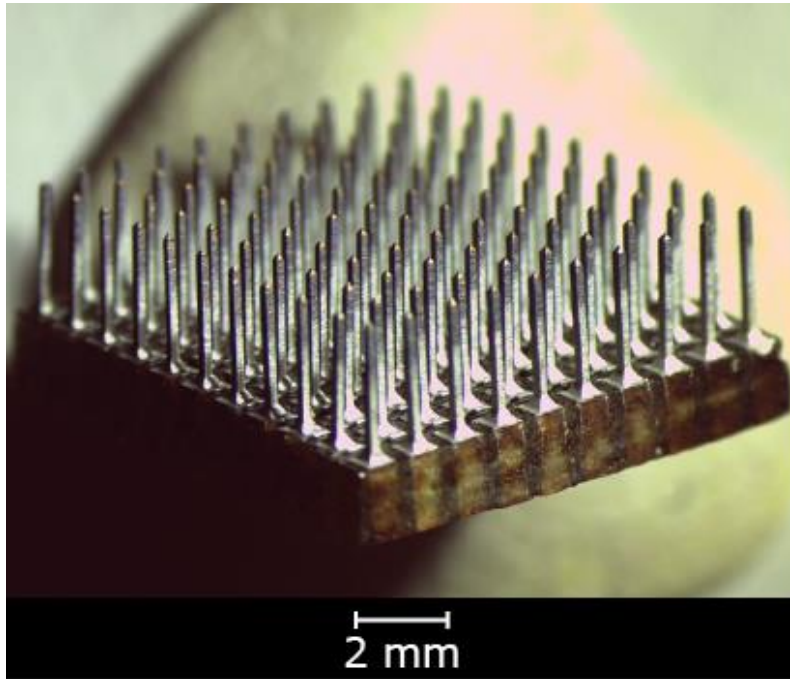


- Aluminum
- Insulation
- Gold
- Encapsulation

Passivação.

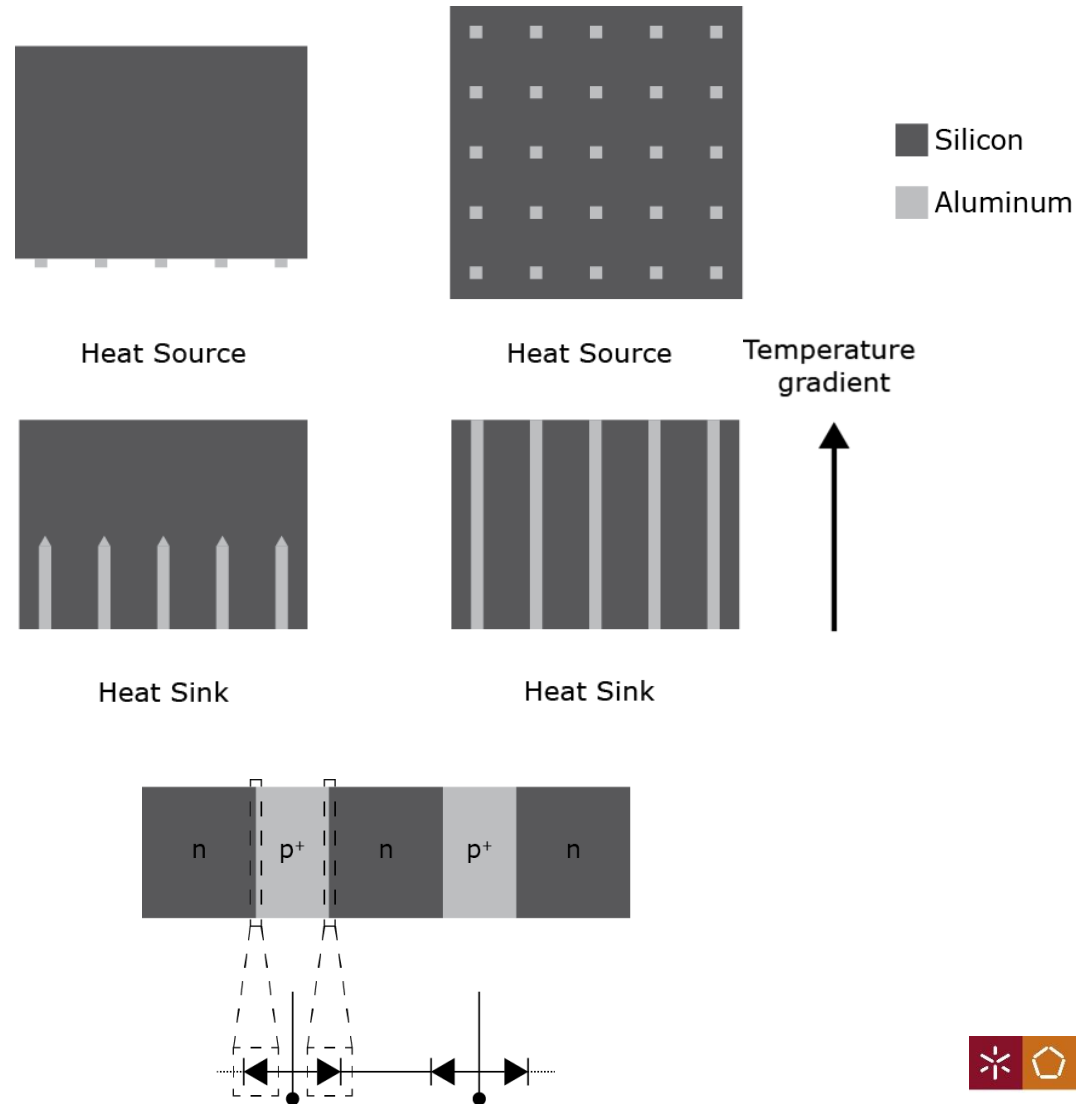
EXEMPLO #3A – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Alumínio



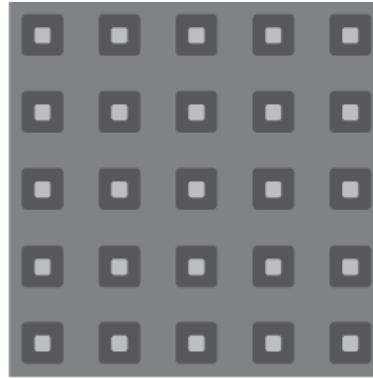
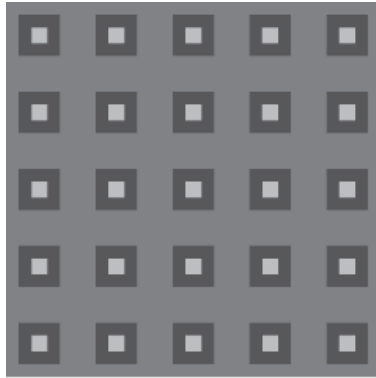
EXEMPLO #3B – MAQUINAGEM MECÂNICA

- Substrato em Silício
- Processo de Termomigração



EXEMPLO #3B – MAQUINAGEM MECÂNICA

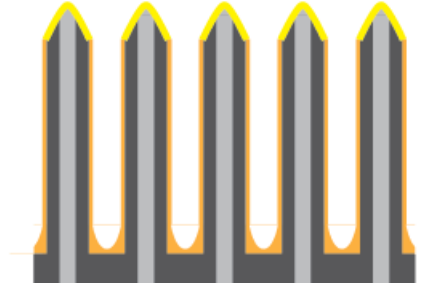
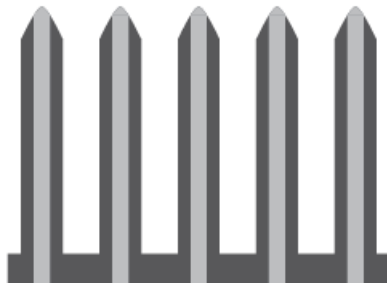
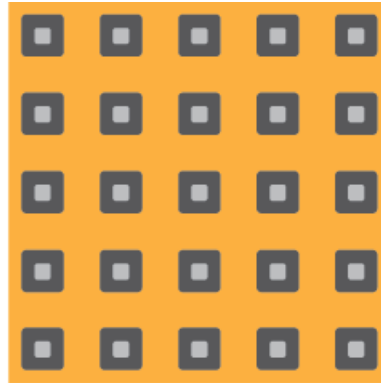
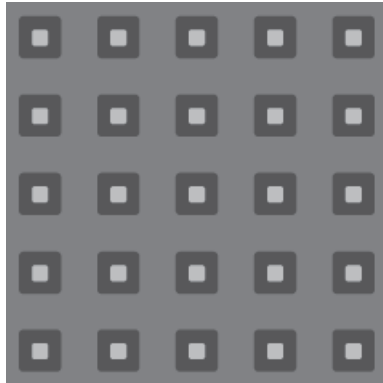
Substrato em Silício



■ Silicon
■ Aluminum-doped Silicon

EXEMPLO #3B – MAQUINAGEM MECÂNICA

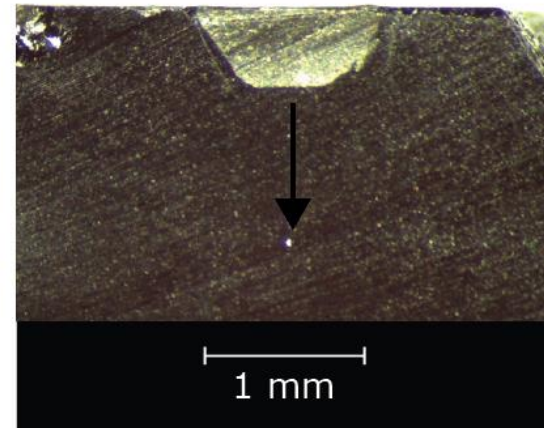
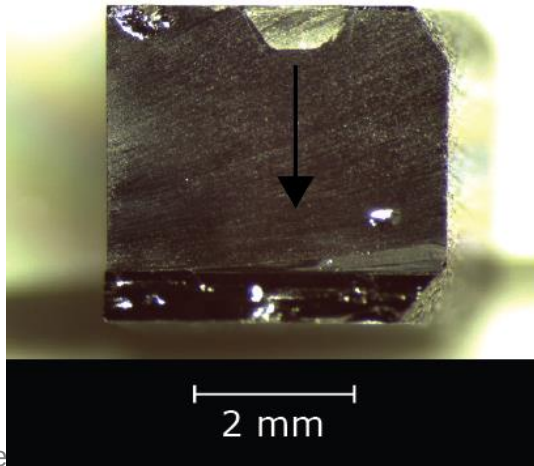
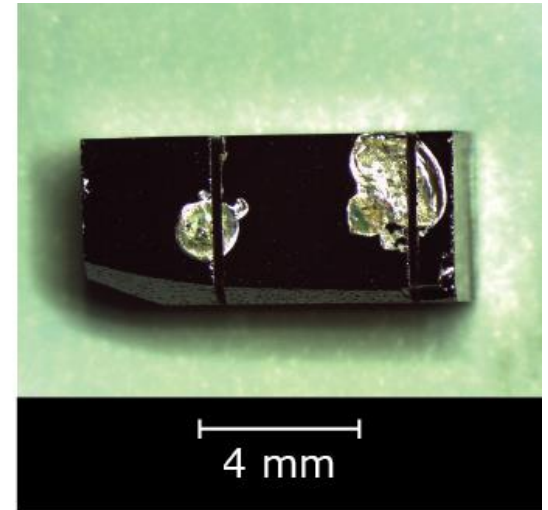
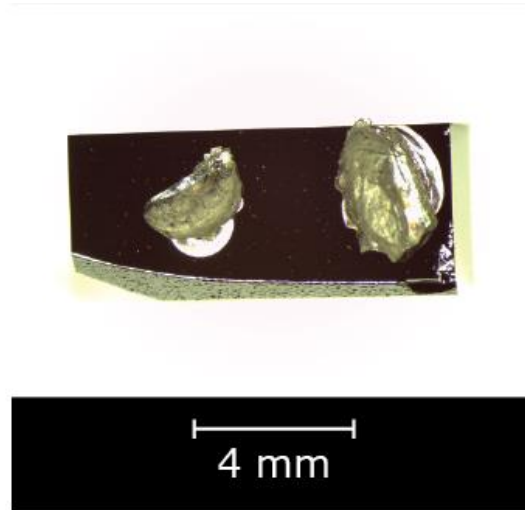
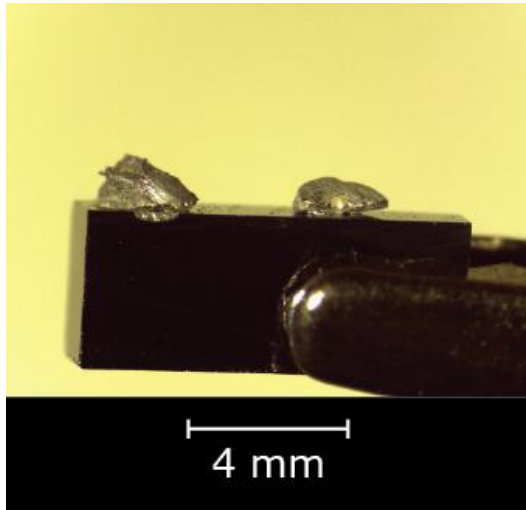
Substrato em Silício



- Silicon
- Aluminum-doped Silicon
- Encapsulation
- Transduction layer

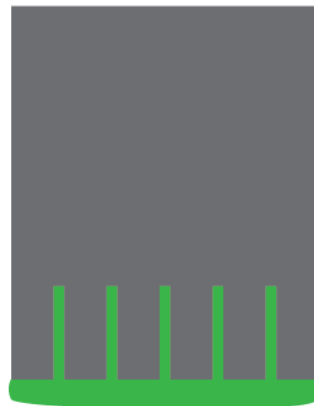
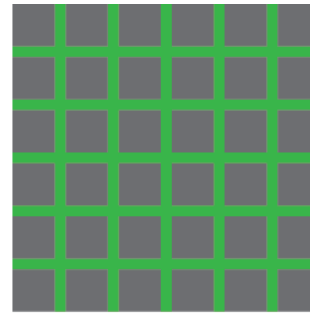
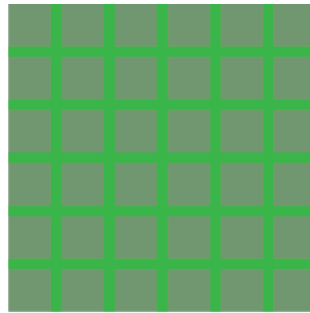
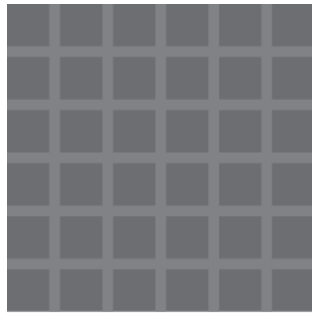
EXEMPLO #3B – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício



EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício

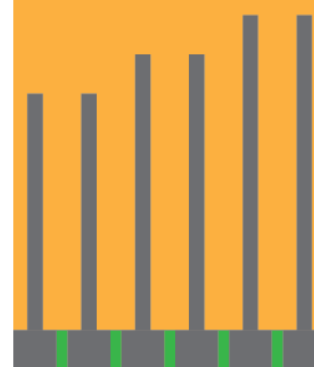
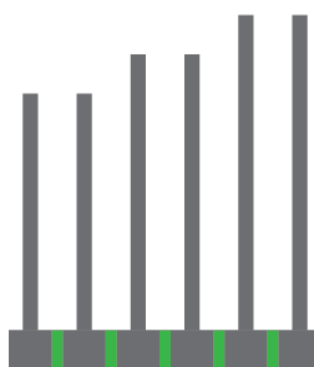
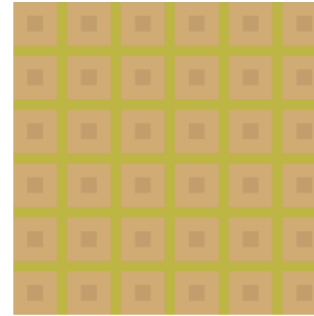
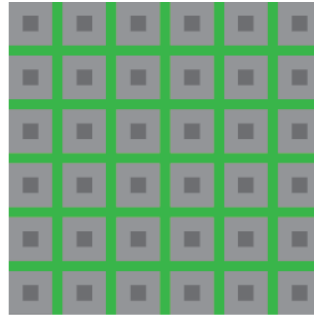


■ Silicon

■ Insulation

EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

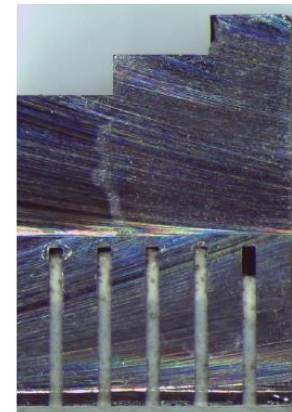
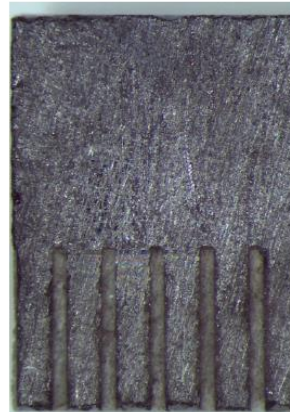
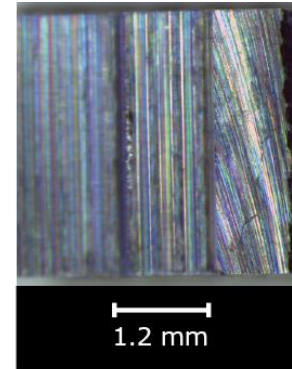
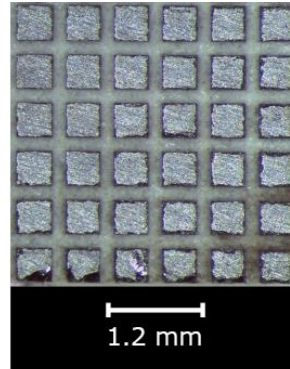
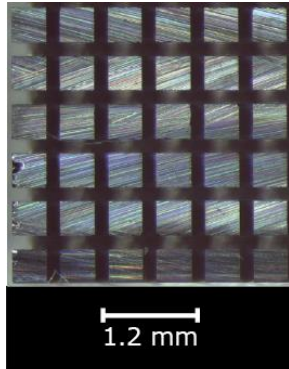
Substrato em Silício



- Silicon
- Insulation
- Encapsulation

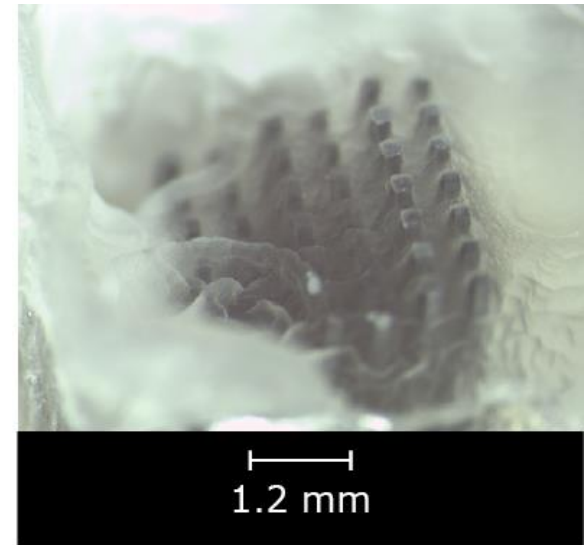
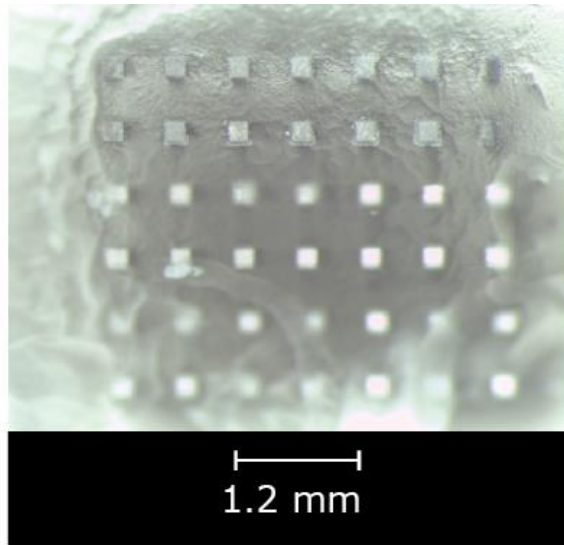
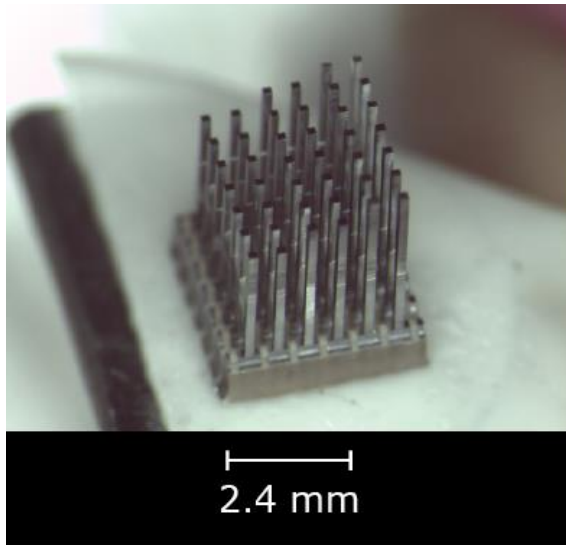
EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício



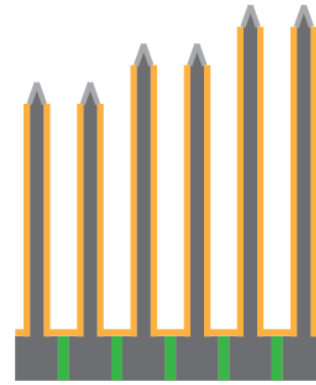
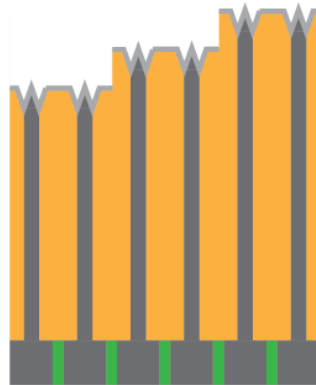
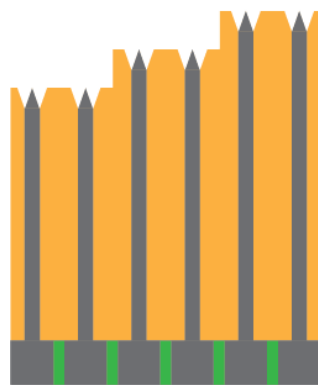
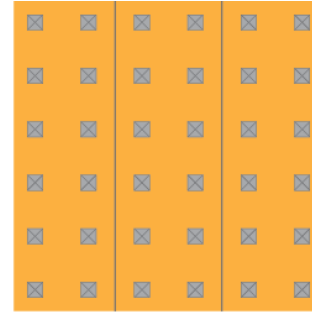
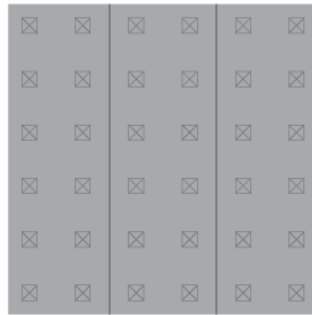
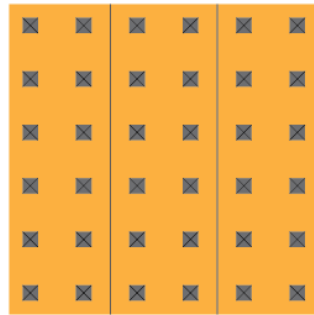
EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício



EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

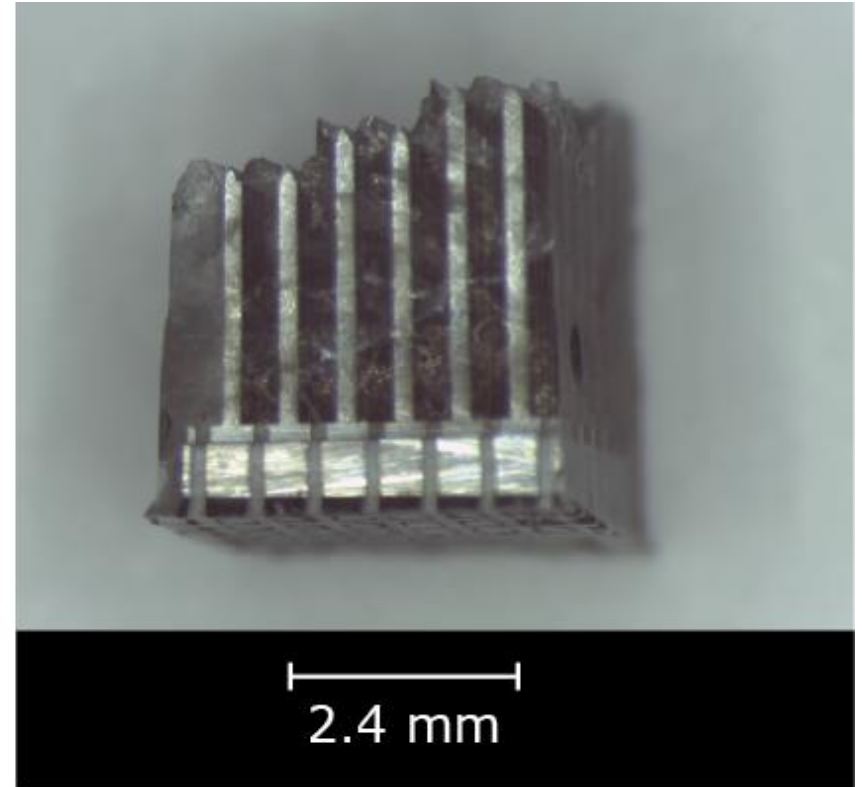
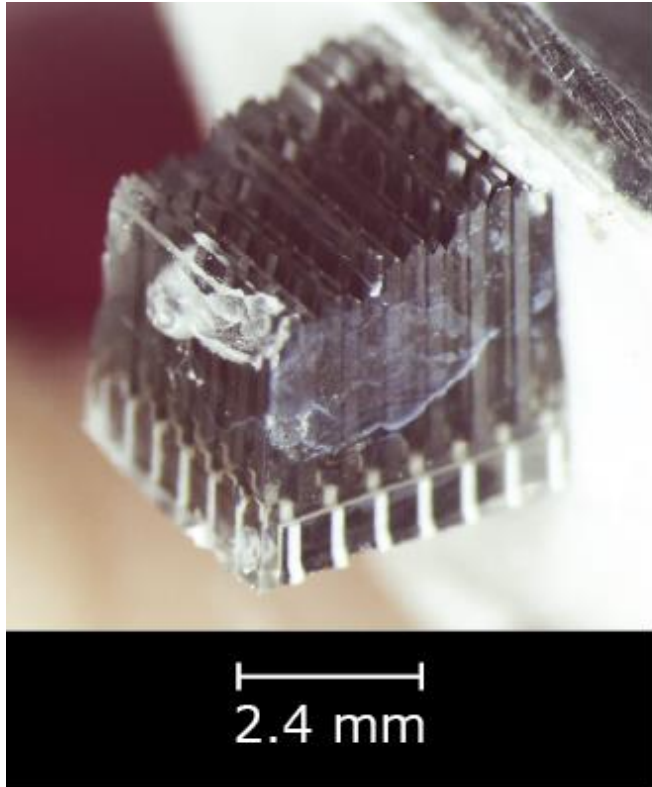
Substrato em Silício



- Silicon
- Insulation
- Encapsulation
- Platinum

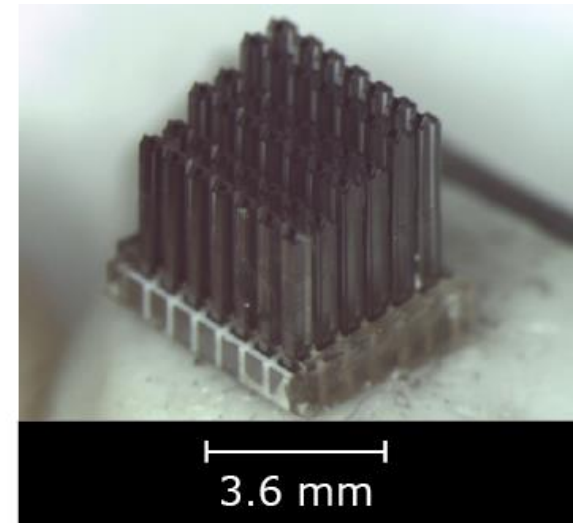
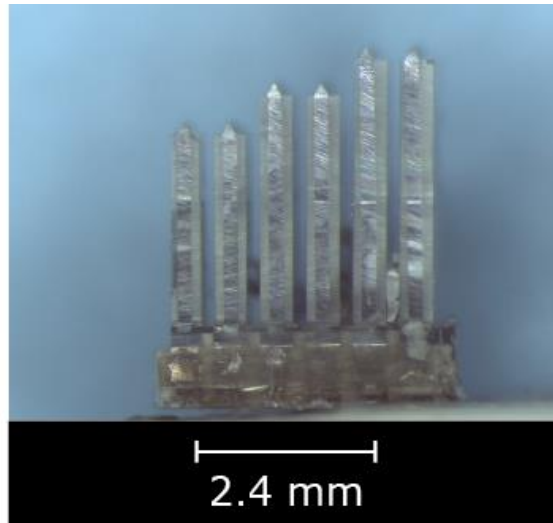
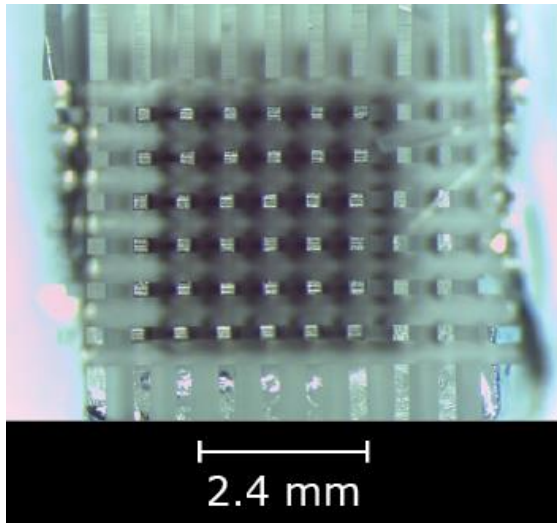
EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício



EXEMPLO #3B' – MAQUINAGEM MECÂNICA

Substrato em Silício



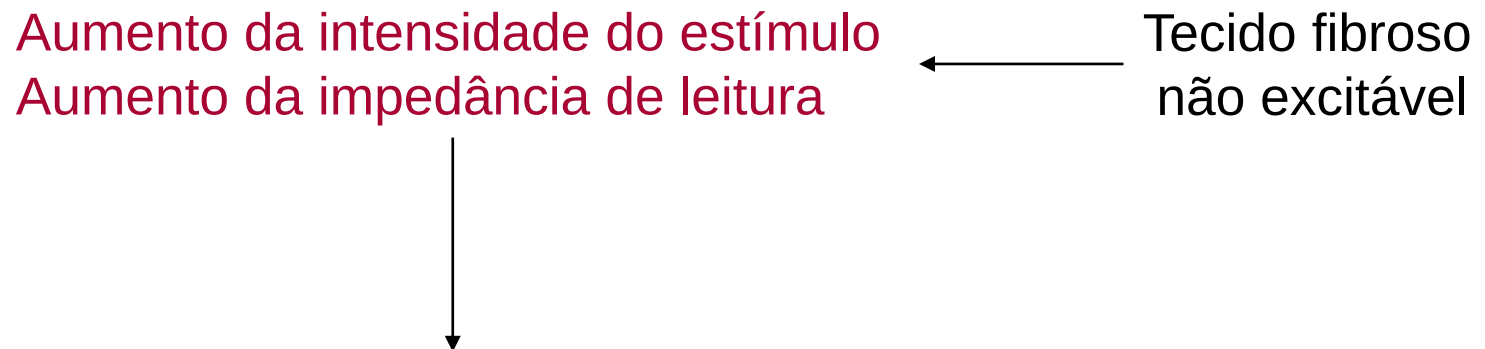
MATERIAIS PARA ELÉCTRODOS

MATERIAIS

- Critérios para selecção
 - (1) resposta do tecido
 - (2) reposta alérgica
 - (3) impedância eléctrodo-tecido
 - (4) visibilidade por técnicas de imagiologia

MATERIAIS - (1) RESPOSTA DO TECIDO

- Ao implantar um electrodo, o tecido responde criando uma **camada** em seu redor



Alternativas:

- Usar materiais funcionalizados com elementos anti-inflamatórios
- Utilização de materiais “inertes”
- Redução do tamanho dos eléctrodos

MATERIAIS - (2) RESPOSTA ALÉRGICA

- O eléctrodo não deve despoletar uma **resposta alérgica**



- Factor muitas vezes ignorado
- Representa hipersensibilidade

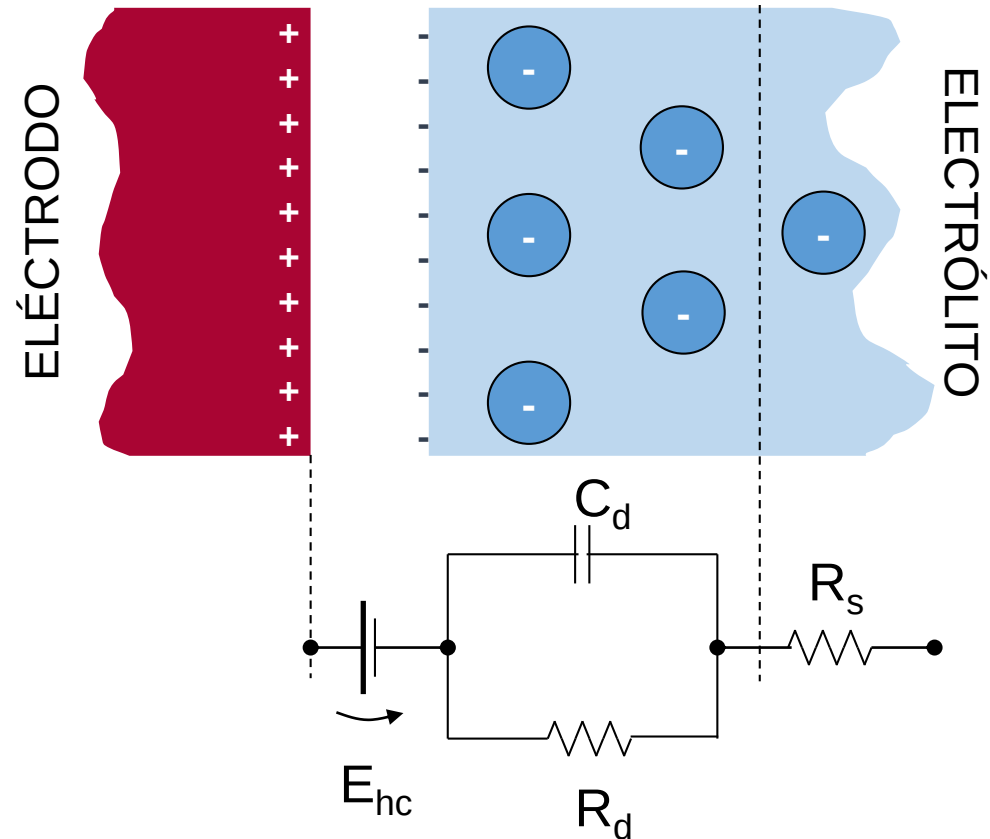
+ sensibilidade ↑

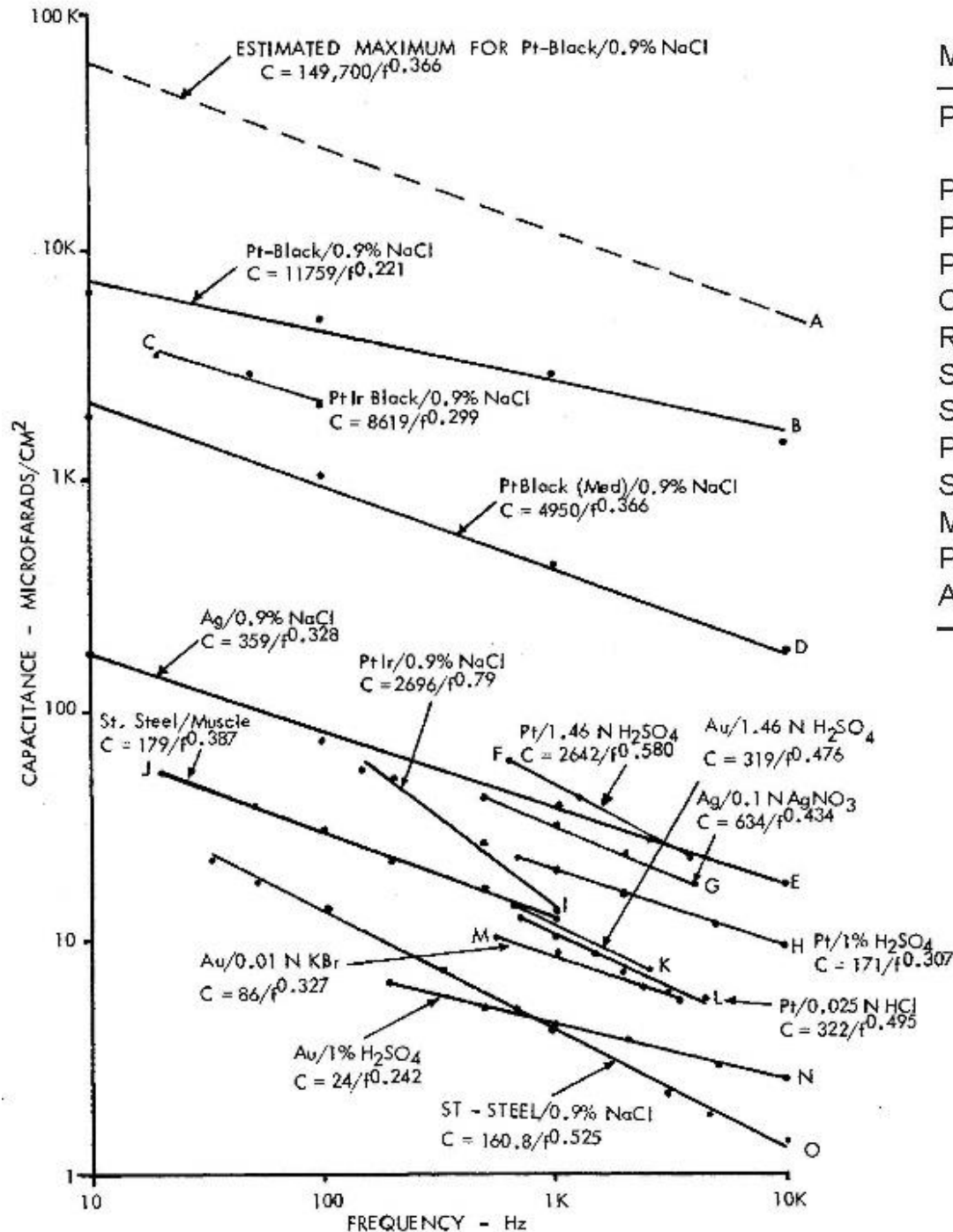
- Níquel
- Crómio
- Cobalto
- Berílio
- Mercúrio
- Cobre
- Ouro
- Prata

Devem-se evitar usar estes materiais para eléctrodos implantáveis

MATERIAIS - (3) IMPEDÂNCIA

- Impedância depende:
 - metal
 - tipo de electrólito
 - área de contacto
 - Temperatura
- A impedância diminui com
 - Aumento da área (rugosidade)
 - Aumento da frequência
 - Aumento da densidade de corrente





Metal type

Platinum black heavy (PtB) (estimated)	$149,700f^{-0.366}$
Platinum-iridium black (PtIrB)	$8619f^{-0.299}$
Platinum black medium (PtB)	$4950f^{-0.366}$
Platinum-iridium (PtIr)	$2696f^{-0.79}$
Copper (Cu)	$705f^{-0.518}$
Rhodium (Rh)	$112f^{-0.210}$
Silver (Ag)	$103f^{-0.259}$
Stainless steel (SS)	$161f^{-0.525}$
Platinum (Pt)	$21.6f^{-0.143}$
Stainless steel (SS)	$17.2f^{-0.266}$
MP35N (Ni Co Cr Mo)	$8.4f^{-0.127}$
Palladium (Pd)	$7.3f^{-0.113}$
Aluminum (Al)	$2.94f^{-0.126}$

MATERIAIS - (4) VISIBILIDADE

Eléctrodos de Pequenas Dimensões → Estimulação e leitura de pequenas populações de células

↑

Visíveis por técnica de imagem médica

Ex.: materiais com elevada absorção de Raios-X
(# atómico elevado)

- Ouro
- Platina
- Platina-Irídio
- Tântalo

CARACTERIZAÇÃO DE ELÉCTRODOS

CARACTERIZAÇÃO

Como medir as características do eléctrodo?

Como comparar as suas características?

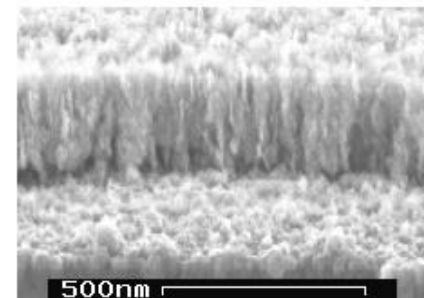
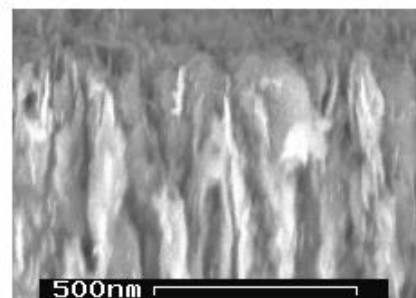
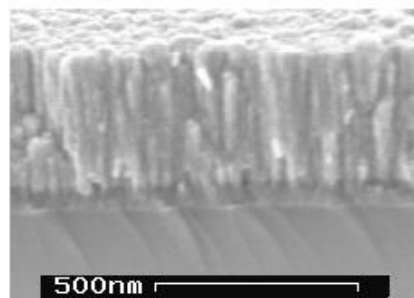
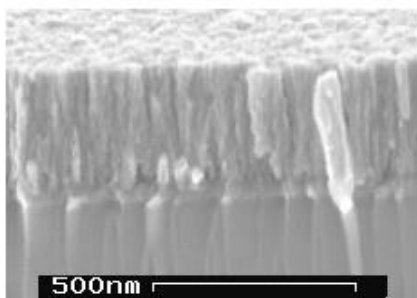
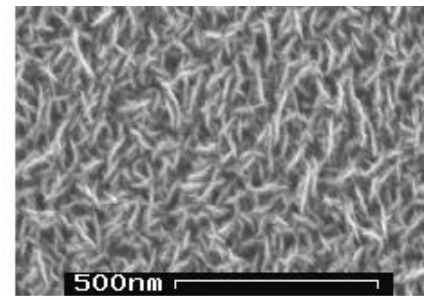
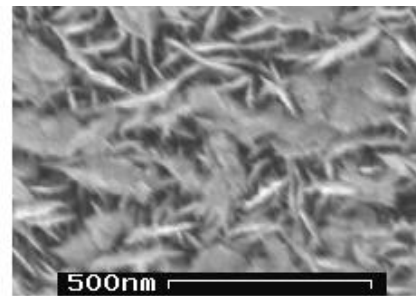
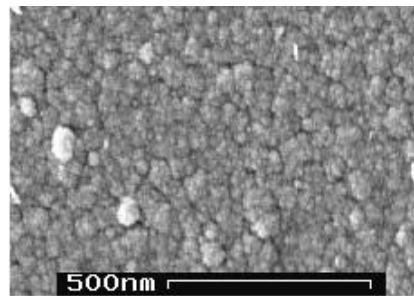
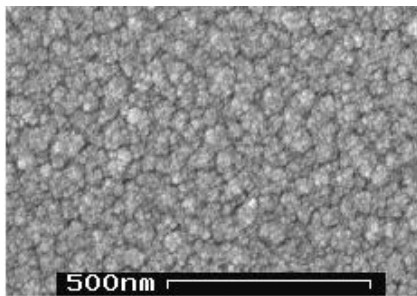
Como decidir sobre a qualidade do eléctrodo?

CARACTERÍSTICAS

- Biocompatibilidade
- Estabilidade
- Facilidade de Utilização
- Propriedades Mecânicas
- Propriedades Eléctricas

MORFOLOGIA

- Imagens SEM – detalhes da morfologia da superfície



$Q(O_2) = 2 \text{ sccm}$

$Q(O_2) = 3,5 \text{ sccm}$

$Q(O_2) = 6,5 \text{ sccm}$

$Q(O_2) = 10 \text{ sccm}$

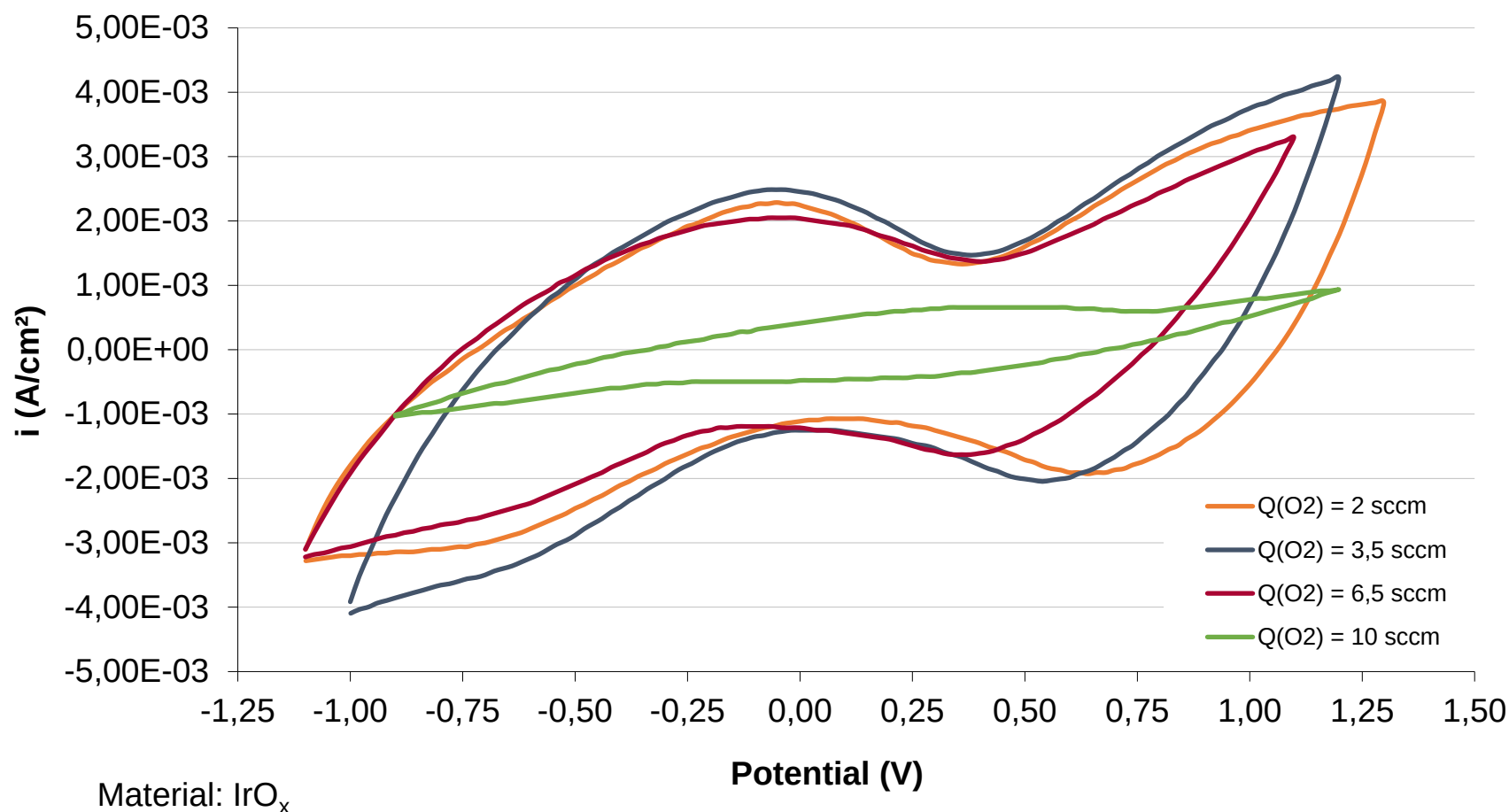
Material: IrO_x



influência no desempenho

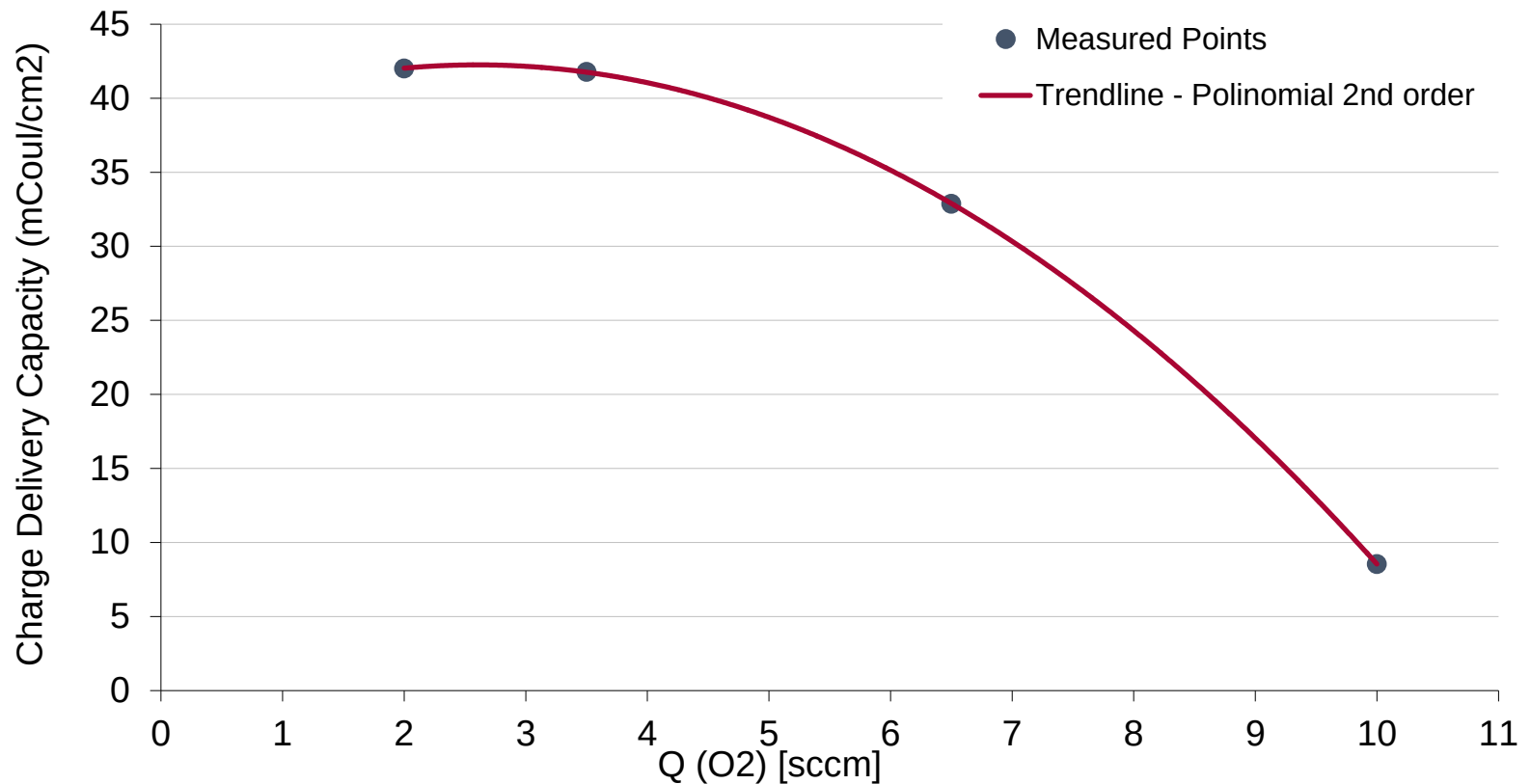
COMPORTAMENTO ELECTRO-QUÍMICO

■ Voltametria Cíclica



COMPORTAMENTO ELECTRO-QUÍMICO

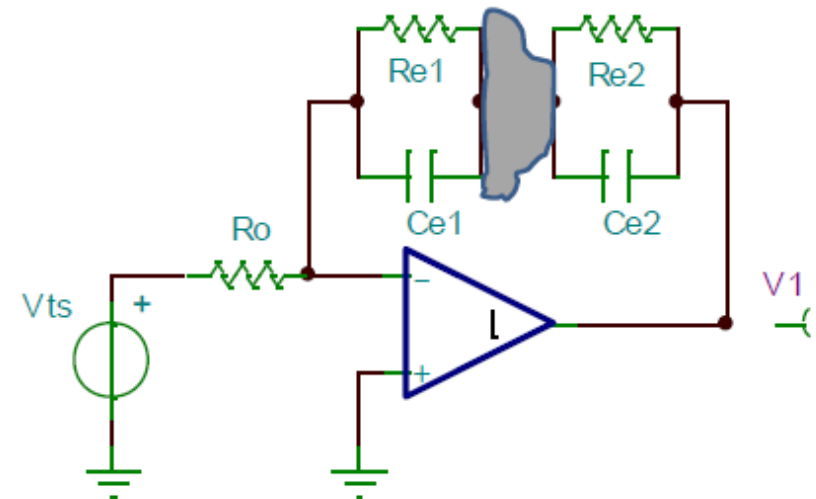
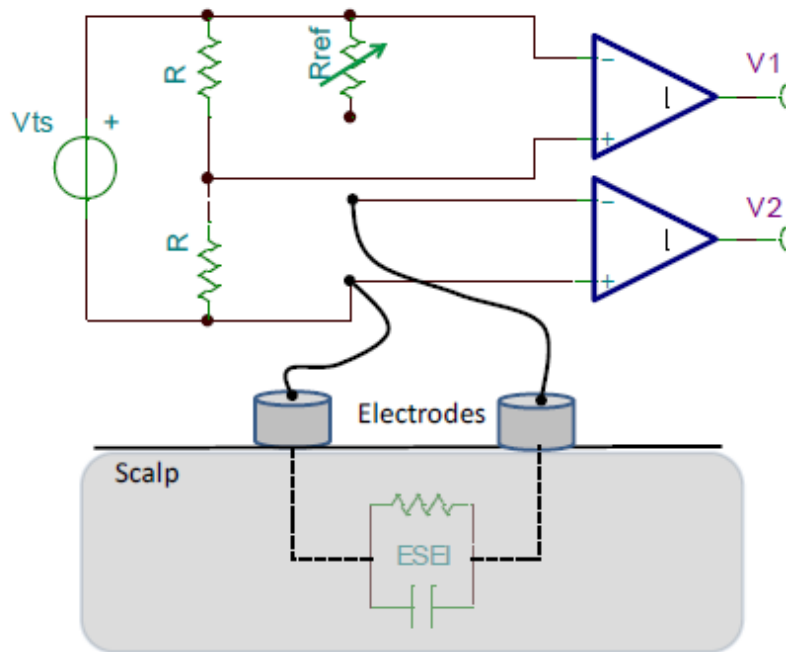
■ Voltametria Cíclica



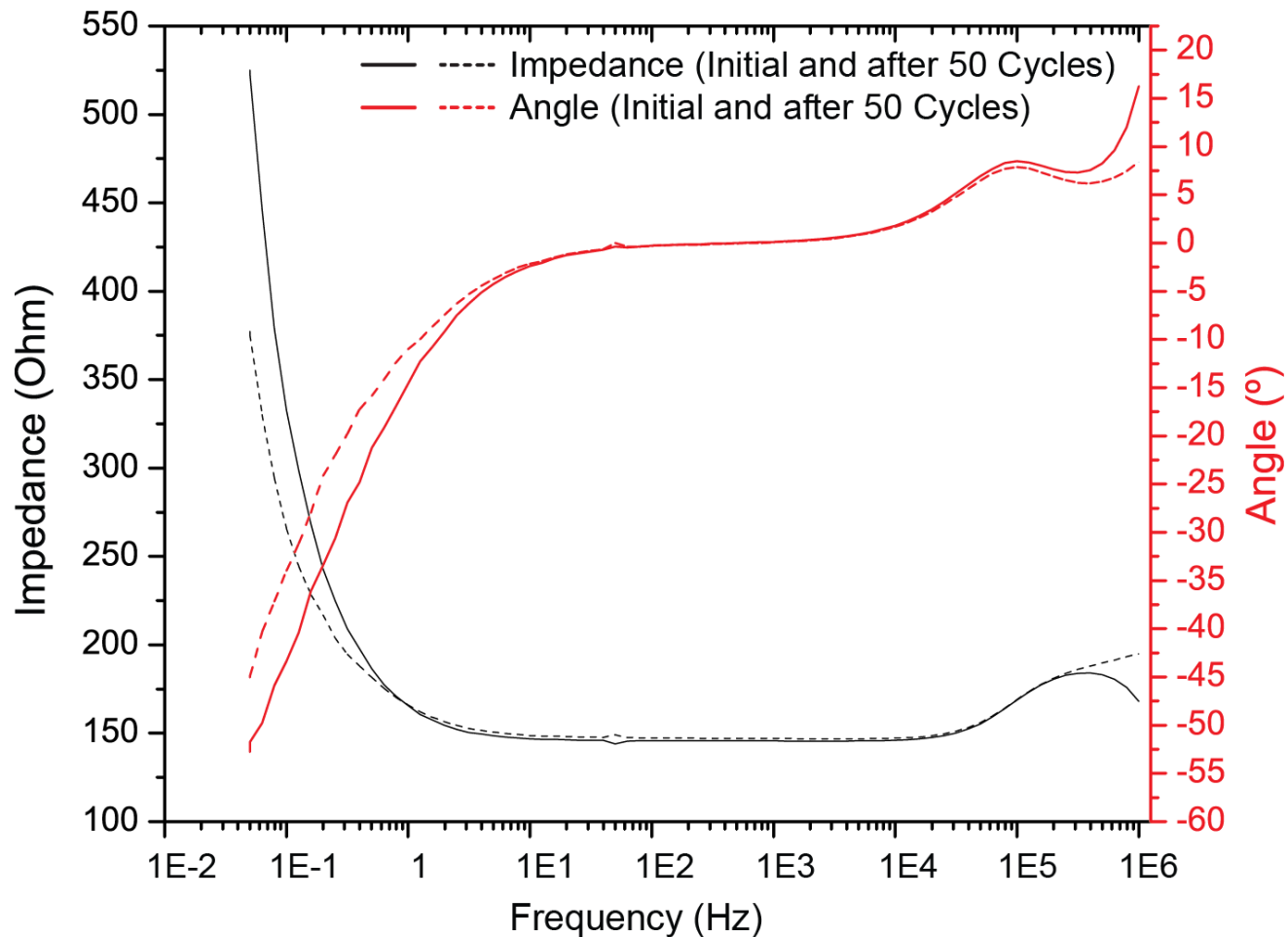
Material: IrO_x

IMPEDÂNCIA

Circuitos para medição de impedância



IMPEDÂNCIA



Material: IrO_x

COMPORTAMENTO MECÂNICO

