

# Sensory w Aplikacjach Wbudowanych

## Technologia MEMS – wytwarzanie współczesnych czujników

dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH

(na bazie materiałów dra inż. Wojciech Maziarz)

Wydział IET, Instytut Elektroniki

Kontakt: [worek@agh.edu.pl](mailto:worek@agh.edu.pl)

# Czujniki mikromechaniczne

## WSTEP

Narzędzia mikroelektroniki zastosowane do struktur mechanicznych pozwalają wytworzyć nie tylko proste czujniki o wymiarach mikronowych, ale całe struktury - mikrosystemy.

*Terminologia:*

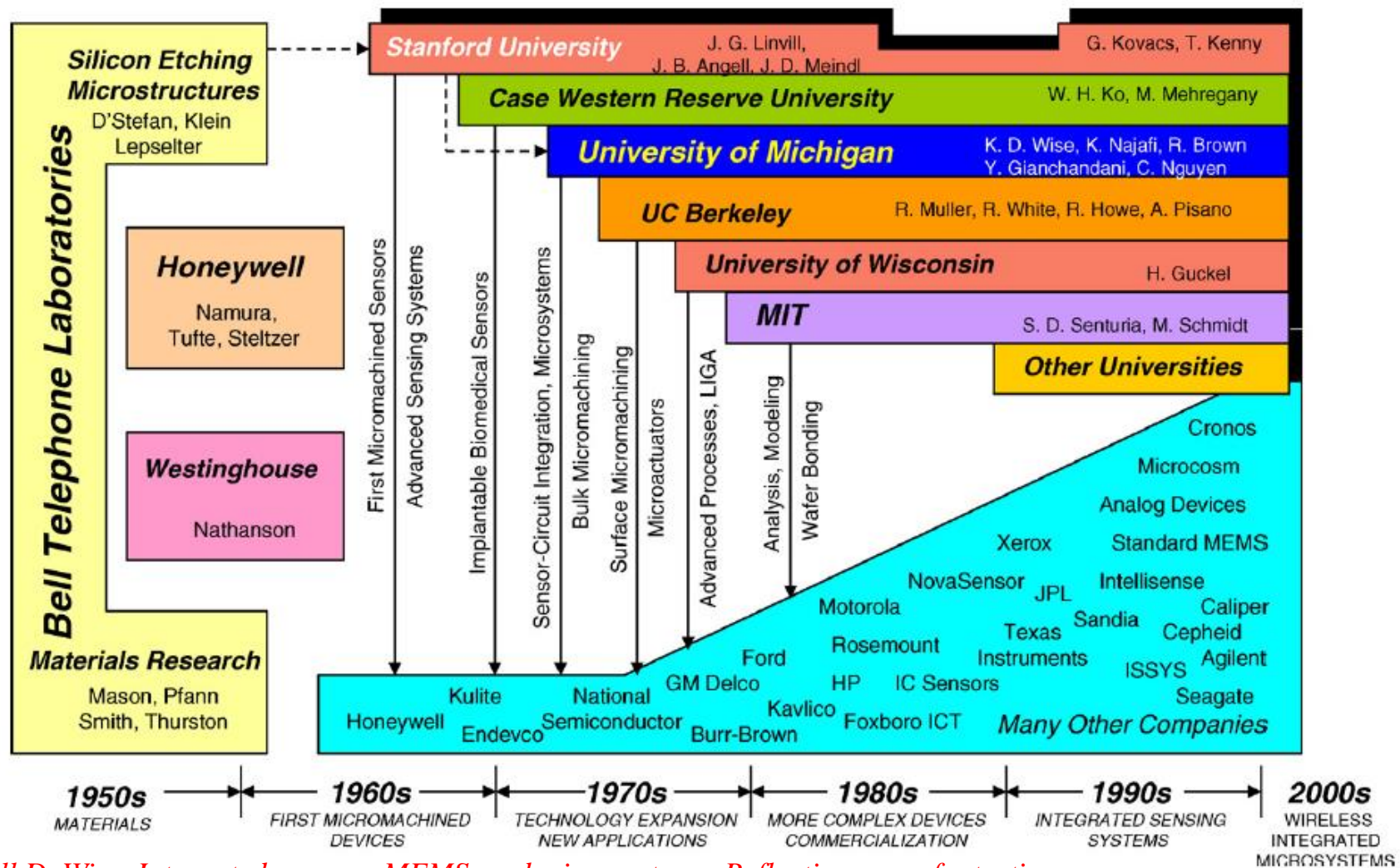
*technologia mikromaszyn - Japonia*

*technologia mikrosystemów MST - Europa*

*systemy mikroelektromechaniczne MEMSy - USA*

Historycznie pierwszym materiałem w technologii mikromechanicznej (i do dziś dominującym) jest Si. Poza tym stosuje się materiały typowe dla technologii CMOS ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al) oraz zaczyna się stosować inne półprzewodniki (SiC, GaAs, diament), metale i ich tlenki, polimery organiczne.

# Ewolucja mikrosystemów, MEMS i układów zintegrowanych - USA



*Kensall D. Wise, Integrated sensors, MEMS, and microsystems: Reflections on a fantastic voyage,*

*Sensors and Actuators A 136 (2007) 39–50*

# Ewolucja mikrosystemów, MEMS i układów zintegrowanych - USA

Na Politechnice Wrocławskiej powstanie pierwszy na świecie miniaturowy mikroskop elektronowy MEMS, wytworzony przy użyciu technik mikroobróbki krzemu i szkła. Będzie to przenośne urządzenie o wymiarach kilku centymetrów, które da nam obraz o wysokiej rozdzielczości i kontraście – mówi dr hab. Anna Górecka-Drzazga, prof. PWr.

Mikroskop będzie można wykorzystać do badania próbek biologicznych, potrzebnych m.in. we wczesnej diagnostyce nowotworów.

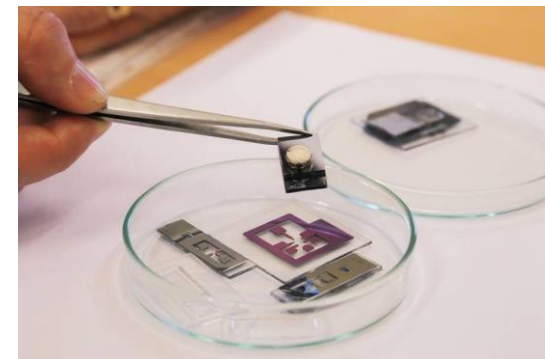
W jej zespole badawczym w Zakładzie Mikroinżynierii i Fotowoltaiki opracowano pierwszą na świecie jonowo-sorpcyjną pompę próżniową MEMS. To naprawdę duże osiągnięcie. Nawet pompa opracowana w Instytucie Technologicznym w Massachusetts (MIT), której działanie bazuje na tym samym zjawisku, nie wytwarza wysokiej próżni – twierdzi profesor.

Naukowcy postanowili spróbować połączyć mikropompę z innymi miniaturowymi urządzeniami, czyli najpierw opracować mikroskop elektronowy MEMS, a w przyszłości lampę rentgenowską czy spektrometr mas.

Signal detection and imaging methods for MEMS electron microscope

Ultramicroscopy Volume 244, February 2023, 113653

<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2022.113653>



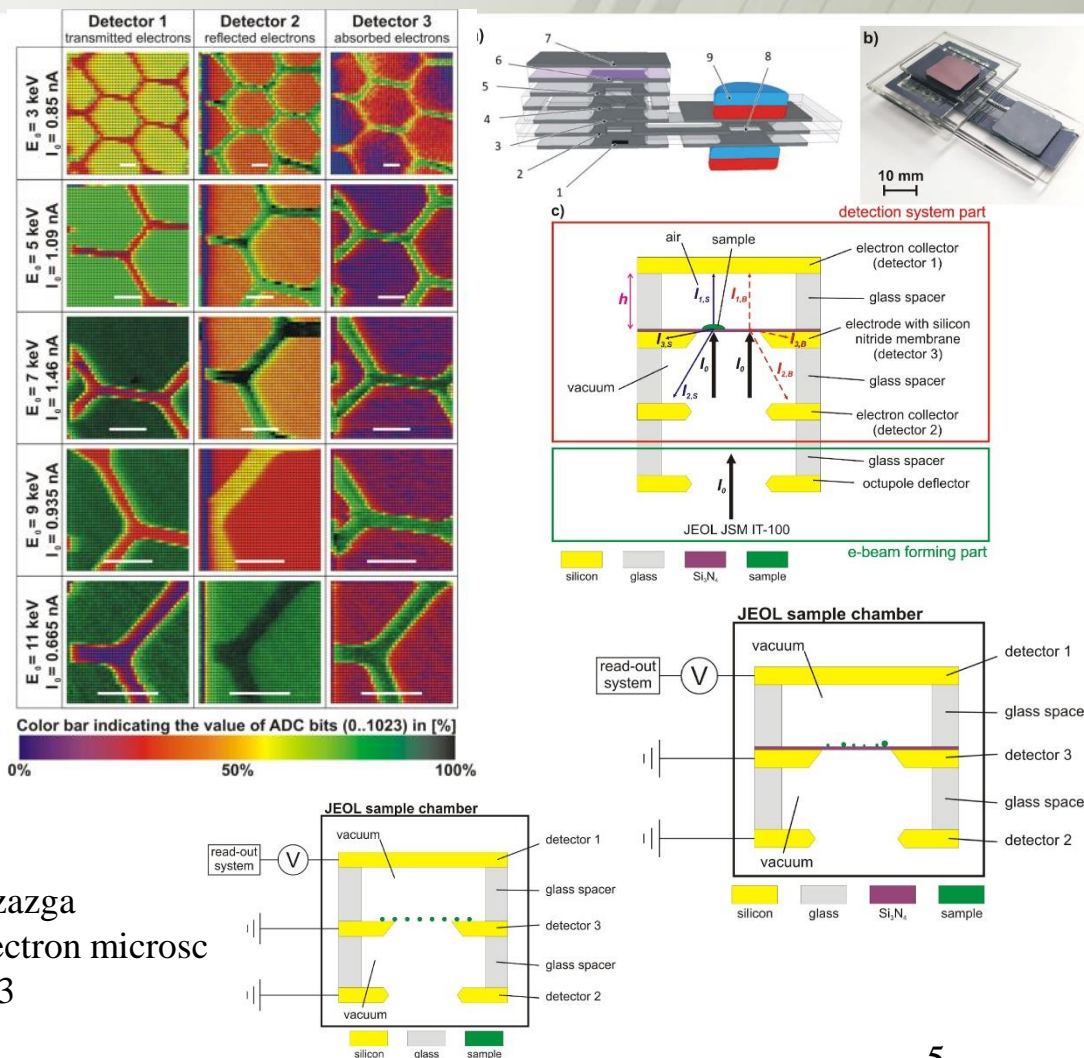
<https://kopalniawiedzy.pl/mikroskop-elektronowy-na-chipie-MEMS-Politechnika-Wroclawska-chip-Anna-Gorecka-Drzazga-Michal-Krysztof-Tomasz-Grzebyk-Piotr-Szyszka,26015>

Naukowcy z PWr konstruuja mikroskop elektronowy na chipie



# Ewolucja mikrosystemów, MEMS i układów zintegrowanych - USA

Przedstawione systemy detekcji mogą być wykorzystane do wykrywania sygnałów w miniaturowym mikroskopie elektronowym MEMS, jednak najlepsze obrazy dla danego detektora uzyskano przy różnych parametrach (energia wiązki elektronów, napięcia bias detektora). Możliwa jest obserwacja próbki zarówno w wysokiej próżni, jak i w powietrzu atmosferycznym. W ostatecznej realizacji mikroskopu elektronowego MEMS można z powodzeniem włączyć wszystkie trzy systemy detekcji. Ponieważ każda z metod daje inny obraz, ich zastosowanie może zwiększyć użyteczność mikro zakresu i dać więcej informacji o próbce.



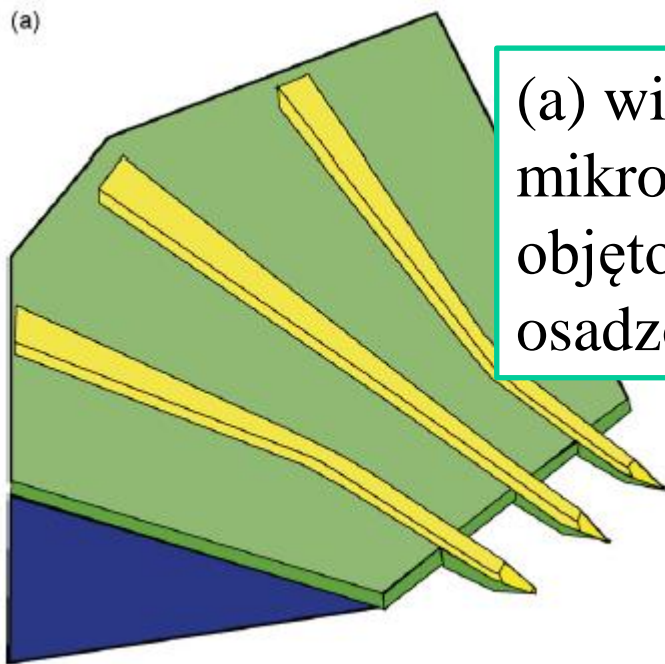
M. Białas, T. Grzebyk, M. Krysztof, A. Górecka-Drzazga  
Signal detection and imaging methods for MEMS electron microsc  
Ultramicroscopy Volume 244, February 2023, 113653  
<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2022.113653>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304399122001723?via%3Dihub>

Naukowcy z PWR konstruują mikroskop elektronowy na chipie

# Ewolucja mikrosystemów - neurofizjologia (1)

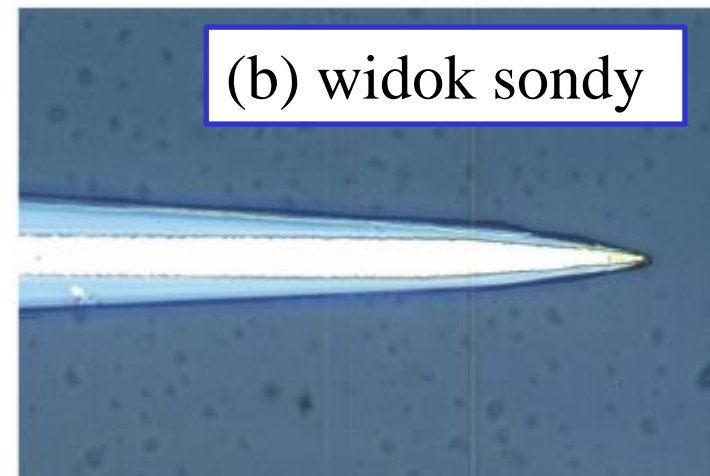
## Krzemowa sonda nerwowa (1969)



(a) widok struktury –  
mikromechanika  
objętościowa +  
osadzony dielektryk

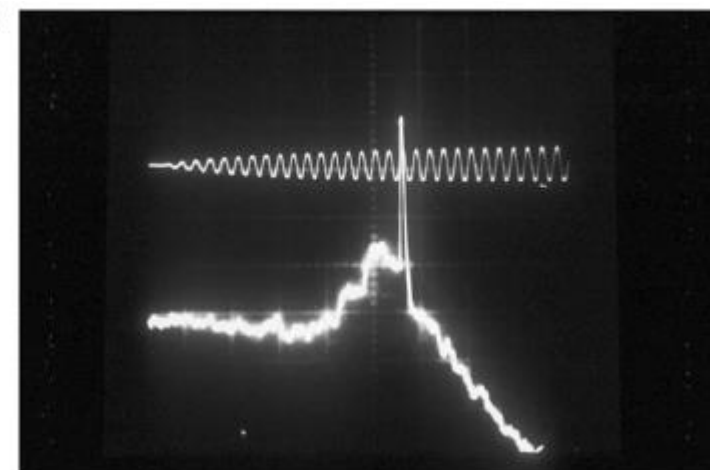
(c) widok impulsu nerwowego z  
kory słuchowej kota w odpowiedzi na dźwięk  
dzwonka. Metalizacja sondy: 20um.

(b)



(b) widok sondy

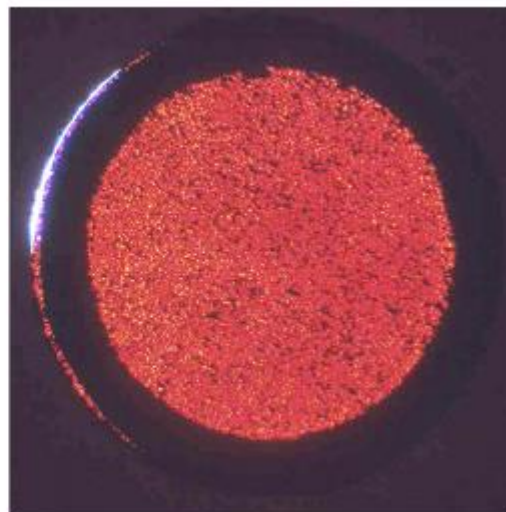
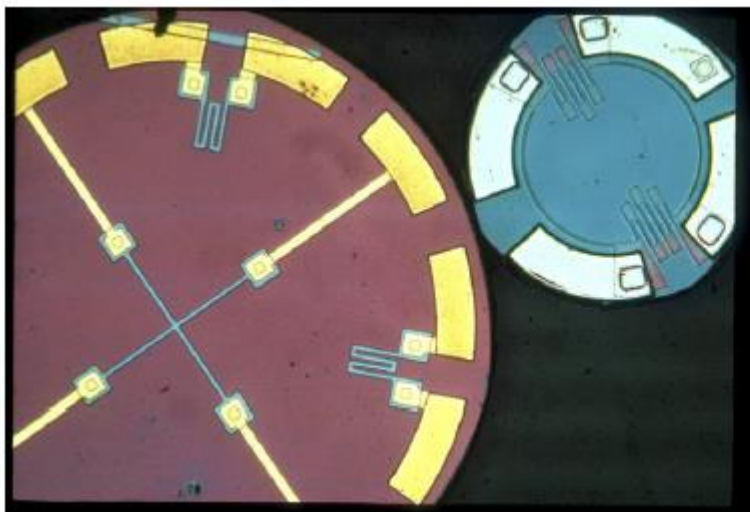
(c)



# Ewolucja mikrosystemów - pomiar ciśnienia (2)

## Czujniki ciśnienia (1970)

Projekty fundowane przez NASA  
Anizotropowe trawienie (Bell Labs)



- a) membrany o grubości 50  $\mu\text{m}$  wytworzone poprzez anizotropowe trawienie.
- b) Średnice 0.8 and 1.6 mm. Po prawej widoczne przejście światła przez membranę o grubości 5  $\mu\text{m}$ .

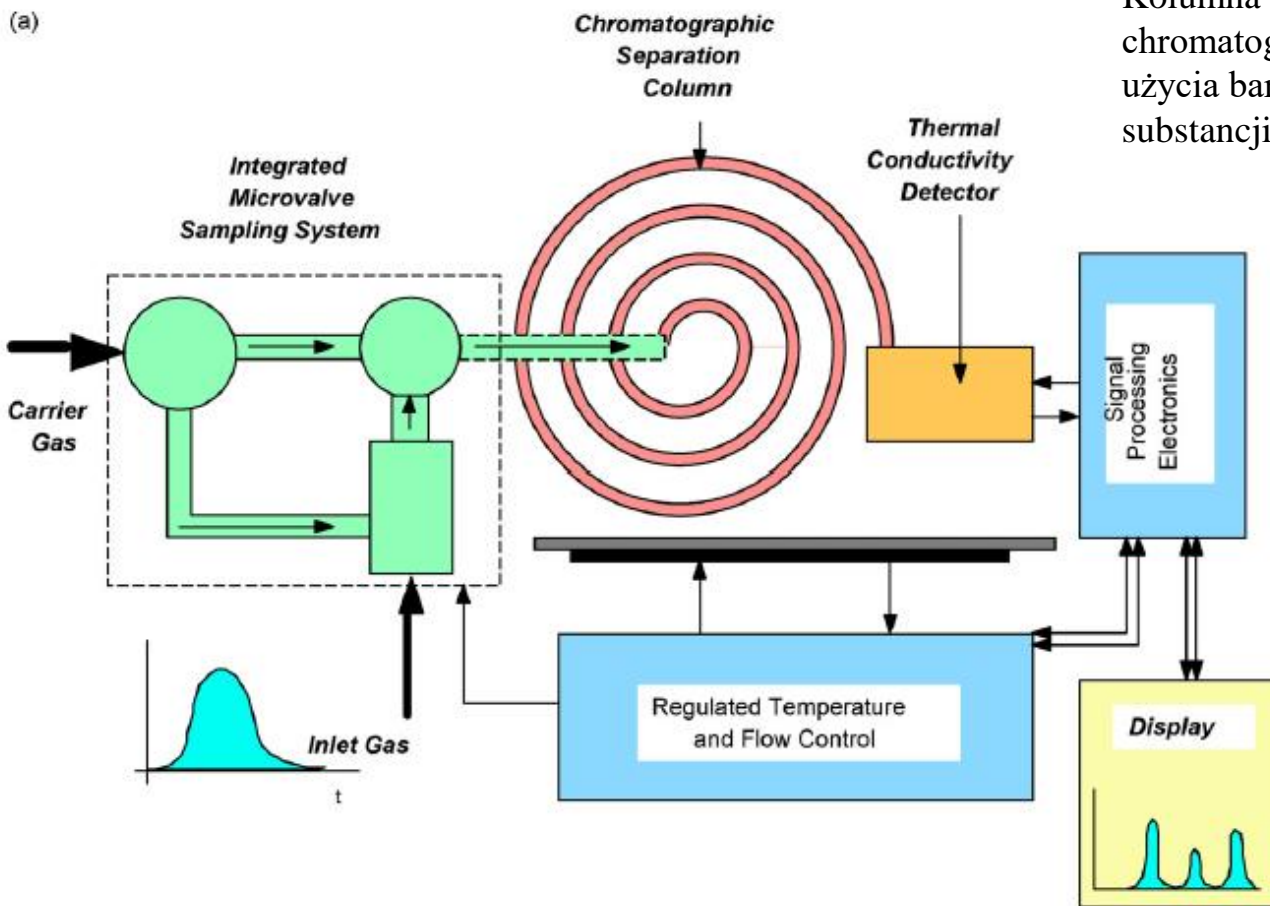


# Ewolucja mikrosystemów - pomiar gazów (3)

## System chromatografii gazowej (1970)

## Misja na Marsa Viking (1975)

Kolumna - trawienie izotropowe Do zalet chromatografii gazowej jest należy możliwość użycia bardzo niewielkiej objętości analizowanej substancji – od 0,01  $\mu\text{l}$  do maksymalnie 100  $\mu\text{l}$ .





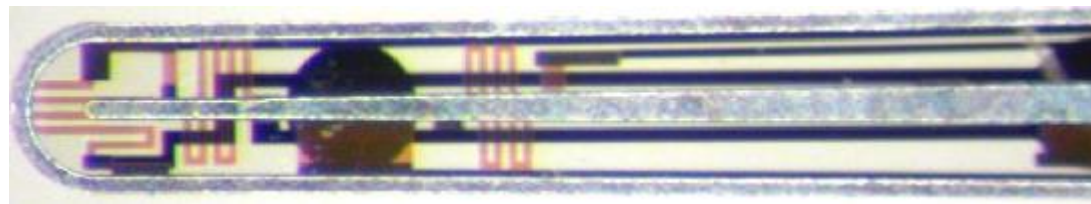
# Ewolucja mikrosystemów

## - mikrosystemy bezprzewodowe zint. (4)

### Mikrosystem dla niesłyszących (2006)



Hermetycznie zamknięte opakowanie zawierające mikrokontroler, elektronikę, bezprzewodowy interfejs, 8-żyłowy przewód i matrycę 32-elektrodową.

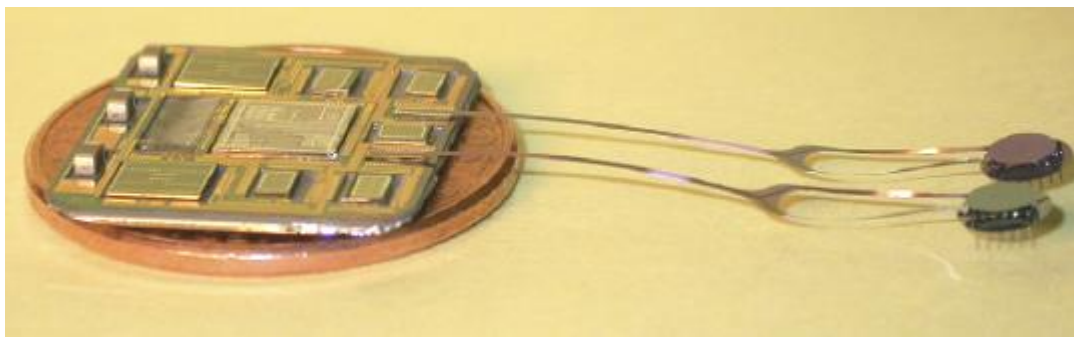


Końcówka jednej z matryc zawierająca **czujniki piezorezystancyjne** do pomiaru kontaktu oraz sondy położenia

# Ewolucja mikrosystemów

## - mikrosystemy bezprzewodowe zint. (5)

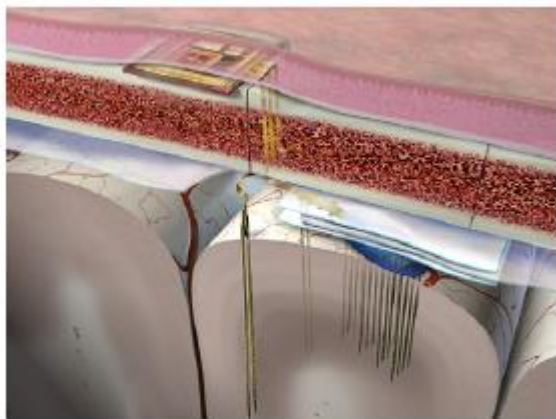
### Implant – mikrosystem bezprzewodowy (2005)



Bezprzewodowy system zapisu sygnału z kory mózgowej.

Zawiera:

64 grupy elektrod,  
(wzmocnienie  $1000\times$  na kanał),  
64-kanałowy układ przetwarzania sygnału,  
interfejs bezprzewodowy do zasilania i transmisji dwukierunkowej.



*Implant pod skórą*



*Elektroda implantu*

# Ewolucja mikrosystemów

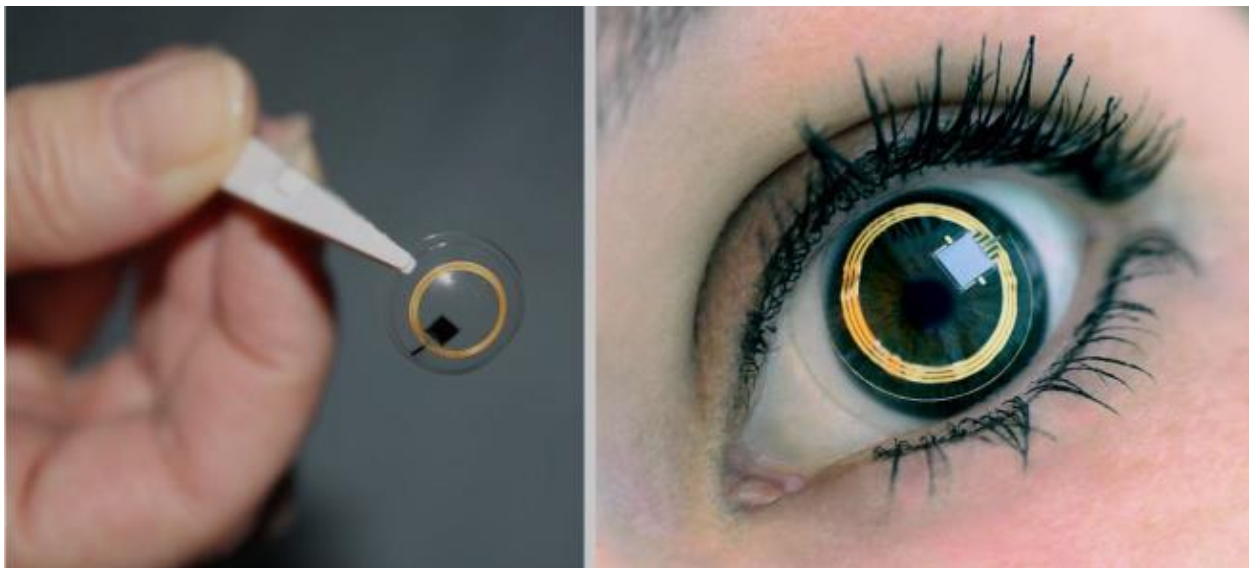
## - mikrosystemy bezprzewodowe zint. (6)

Pomoc pacjentom z jaskrą – czujnik ciśnienia wewnątrzgałkowego  
(*intraocular pressure (IOP)*)

Oko zdrowe: 10-22 mmHg

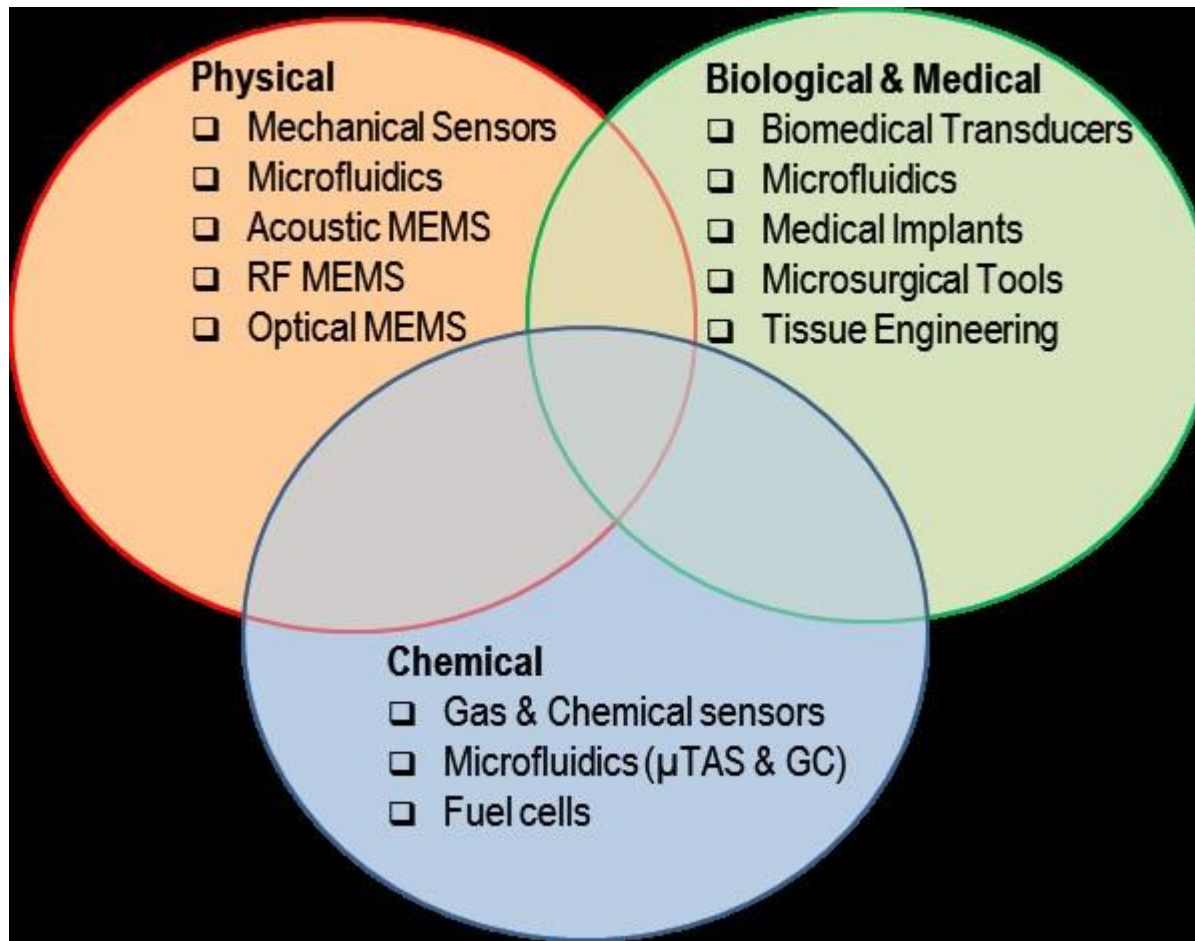
Chore: > 22mmHg oraz fluktuacje ciśnienia

Zniszczenie nerwu wzrokowego przez nadmierne ciśnienie – jaskra.



- Soczewka jednorazowa
- Czujnik ciśnienia MEMS
- Układ dedykowany ASIC
- Antena pętlowa (odbior i nadawanie)

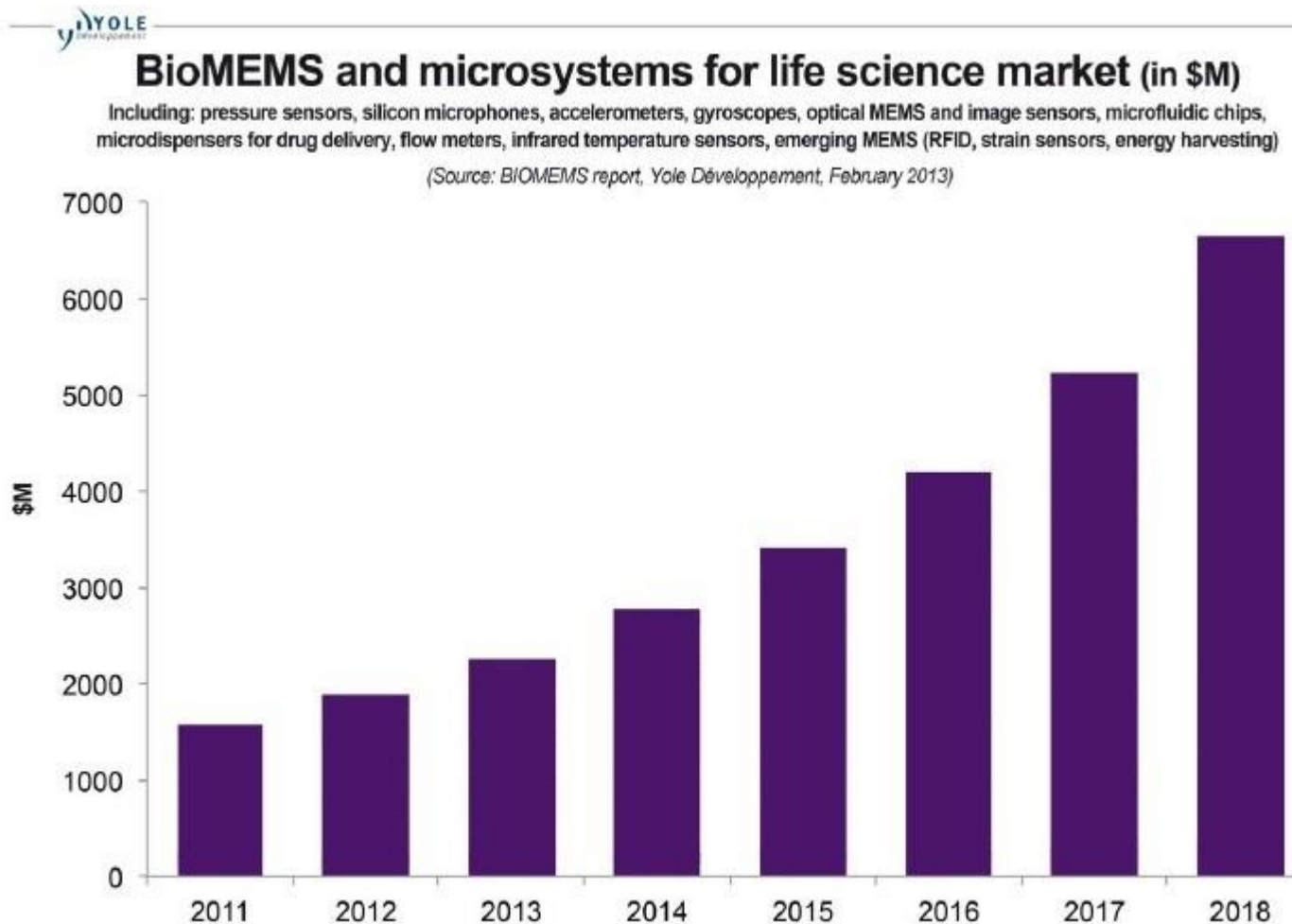
# MEMS



*Zastosowania MEMS w różnych dziedzinach*



# BioMEMS – przewidywany rozwój



*BioMEMS 2013: Microsystem Device Market for Healthcare Applications, Yole Développement, France, Feb. 2013 (Source: <http://www.yole.fr/>)*

# Czujniki mikromechaniczne – materiały

## Szczególne właściwości mechaniczne Si:

- *moduł Younga - bliski stali*
- *granica plastyczności – trzy razy większa niż dla stali*
- *twardość - wyższa niż stali*
- *współcz. rozszerz. term. – siedem razy mniejszy niż dla stali*
- *wysokie przewodnictwo cieplne*
- *nie wykazuje histerezy mechanicznej, niskie wew. tłumienie*
- *silny efekt piezorezystancyjny*
- *wada - kruchość*

Jako półprzewodnik krzem jest najpowszechniej stosowany, stąd **łatwość integracji elementów mechanicznych z elektroniką**.

Mechaniczne i elektryczne własności podłoży krzemowych są **powtarzalne** i łatwo można je zmieniać, komercyjnie wytwarzany c-Si jest wysokiej czystości i jakości.

# Własności wybranych materiałów

## Własności krzemu w porównaniu do innych materiałów

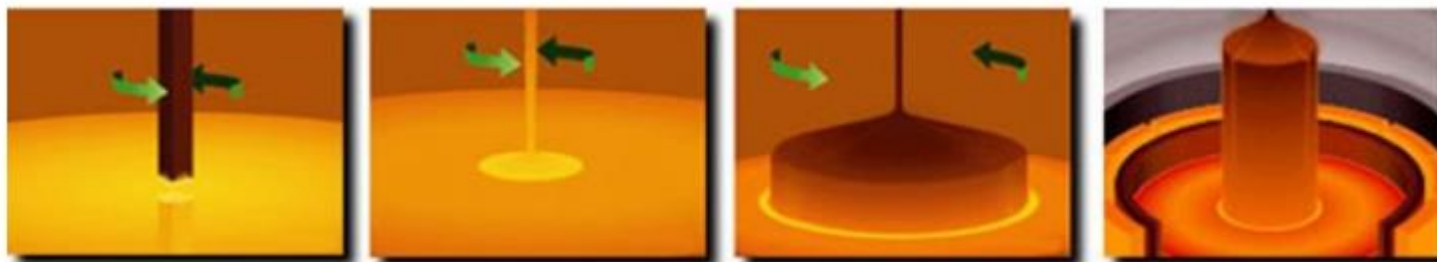
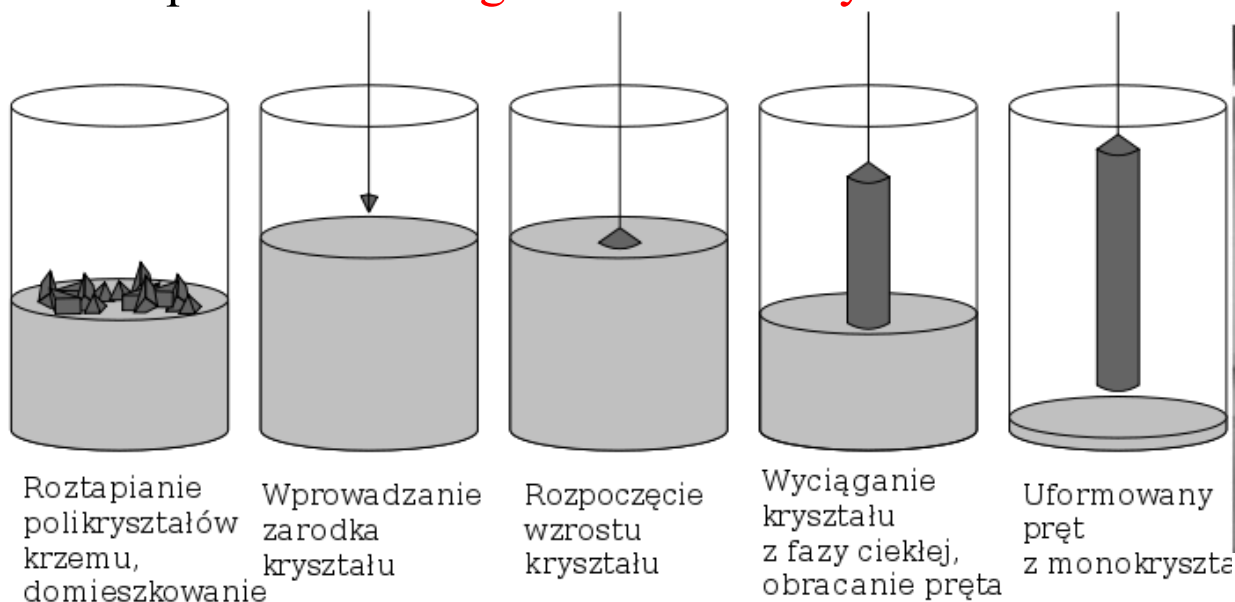
	Si	SiC	diament	Stal nierdz.	Al
Punkt topnienia (st. C)	1350	2830	3550	1400	do 660
Temp. pracy (st. C)	<b>300</b>	<b>873</b>	<b>1100</b>	-	-
Wsp. rozsz. term. ( $10^{-6}/\text{st.C}$ )	2.5	3.3	1	17.3	25
Wsp. przew. ciepl. (W/cm K)	1.57	1.2	20	0.329	2.36
Gęstość (g/cm <sup>3</sup> )	2.3	3.2	3.5	7.9	2.7
Moduł Younga ( $10^{11}$ N/m <sup>2</sup> )	1.9	7	10.35	2	0.7
Granica plastyczności ( $10^9$ N/m <sup>2</sup> )	6.9	21	53	2.1	0.17
Twardość w skali Knoop (kg/m <sup>2</sup> )	<b>850</b>	2480	7000	660	130
Wytrzymałość dielektr. (MV/m)	0.5	4.0	10	-	-
Przerwa energetyczna (eV)	1.12	3.0	5.5	-	-

**Co jest bazą do wytwarzania układów MEMS?**

# Krzem – wytwarzanie

## Metoda Czochralskiego – wyciąganie z fazy ciekłej

najpowszechniej stosowana do produkcji monokryształów półmetali, metali i ich stopów – **w szczególności monokryształów krzemu i półprzewodników**

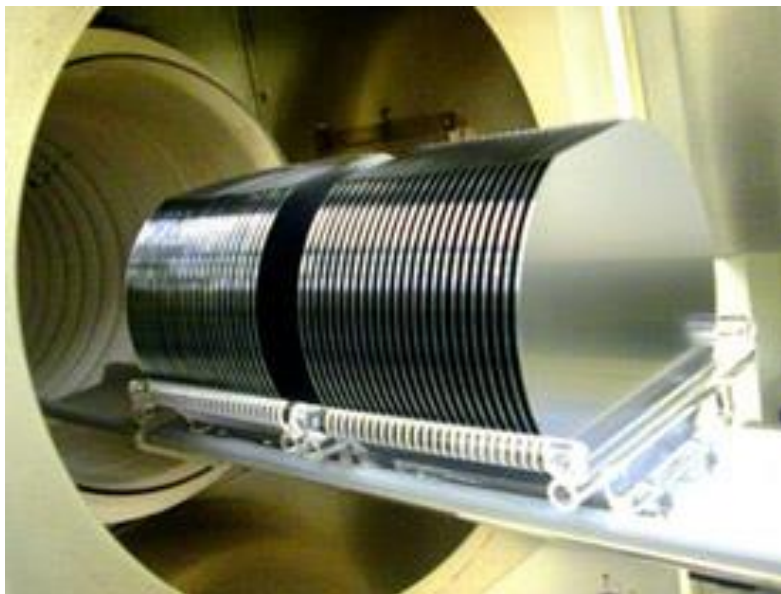




## Krzem – wytwarzanie (2)

Kolejne fazy:

- oczyszczanie, np. przez grzanie strefowe,
- cięcie (piła diamentowa),
- polerowanie

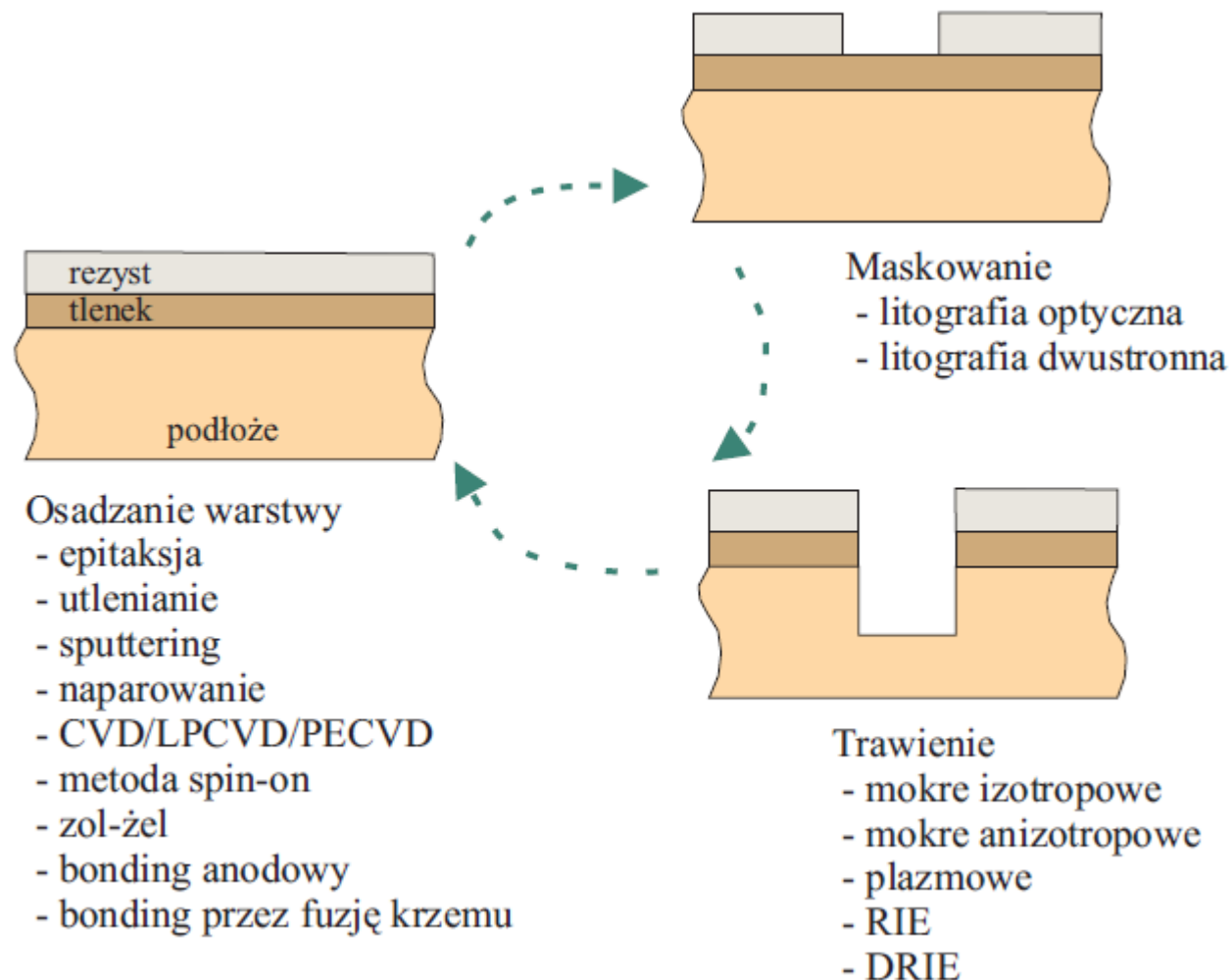


- Technologie top-down i bottom-up
- Podział technologii mikromechanicznych:
  - **objętościowa**:
    - struktury wytwarzane w głębi podłoża (głębokie trawienie c-Si)
    - mikrostruktury 3D (belki, membrany, rowki itp. )
  - **powierzchniowa**: struktury wytwarzane na powierzchni (trawienie warstw naniesionych na podłoże, najczęściej warstw poli-Si na podłoże Si)
  - **LIGA** (niem. *Lithographie, Galvanoformung, Abformung* — litografia, galwanotechnika, formowanie); wytwarza się w niej miniaturowe metalowe kołka zębate, walce, mikroigły itd.
  - inne, np. **EFAB**

# Technologia mikromechaniczna – podstawowe procesy

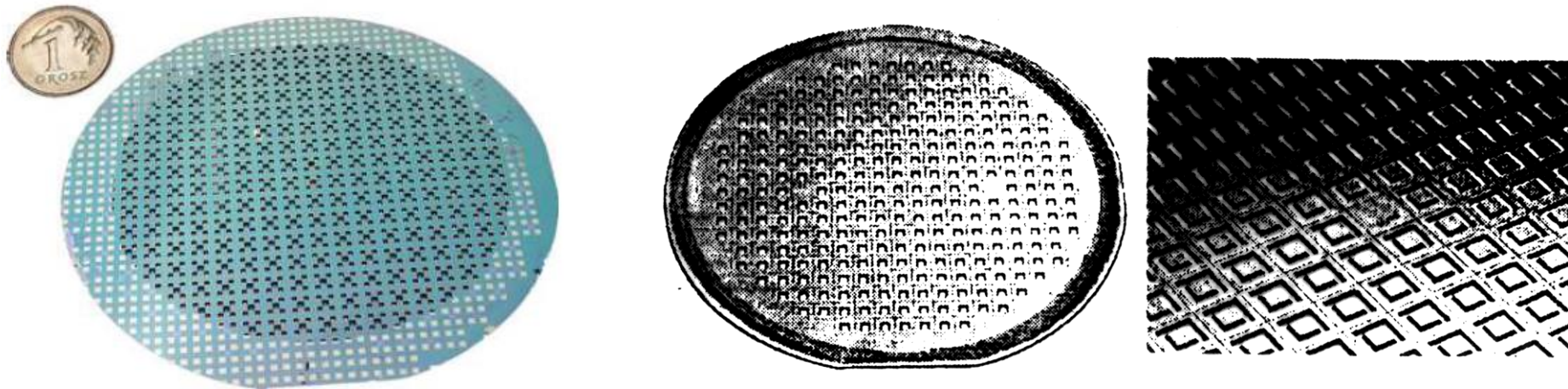
Stosowane metody:

- nanoszenie warstw,
- naświetlanie przez maskę wzoru na fotorezyście,
- trawienie obszarów niepożądanych



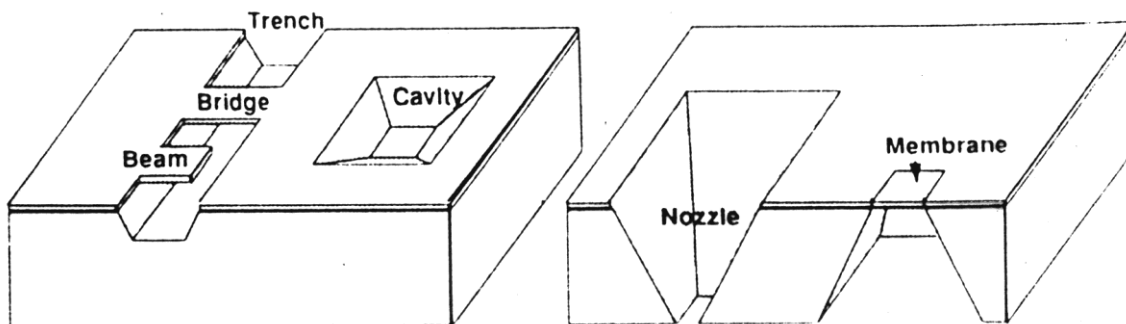
Etapy te są powtarzane aż do uzyskania żądanej struktury.

# Technologia mikromechaniczna



Trzycalowa płytki Si  
z czujnikami gazów (WM-2006)

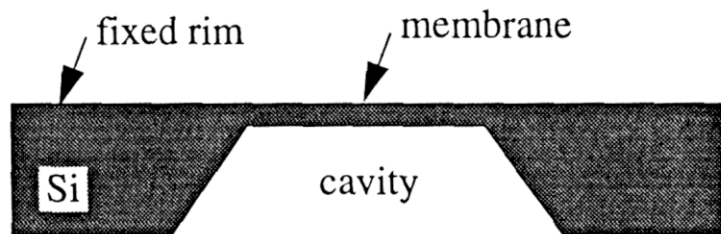
Akcelerometry krzemowe



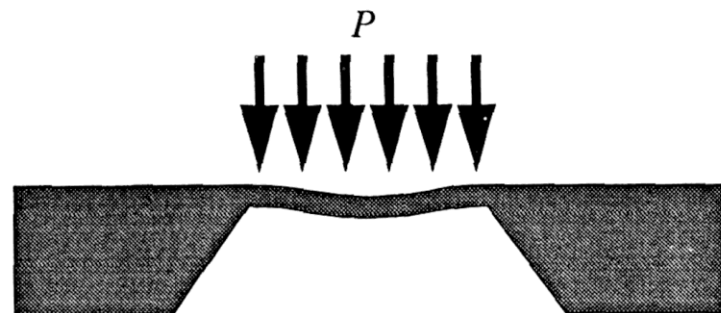
Wybrane mikrostruktury powstałe w wyniku trawienia



# Elementy mikromechaniki objętościowej

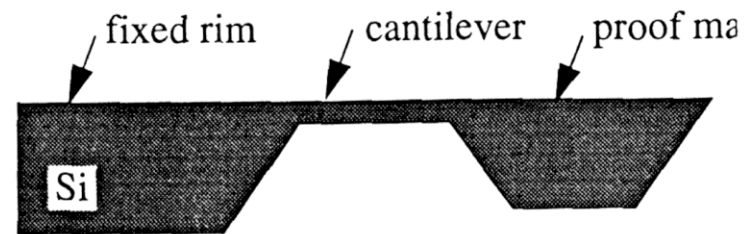


(a)

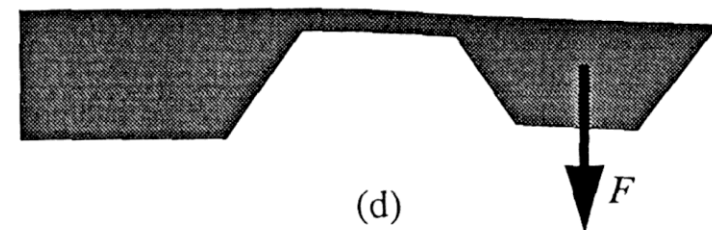


(b)

membrany



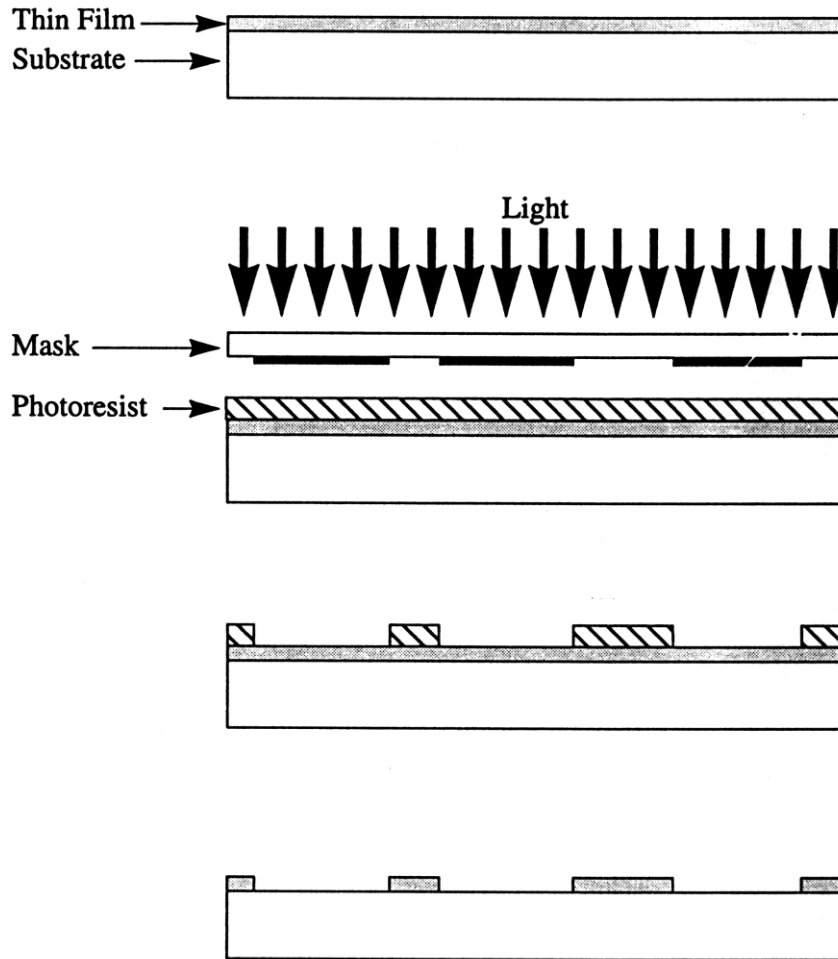
(c)



(d)

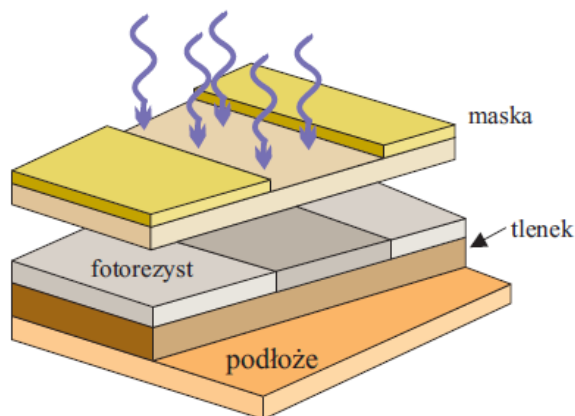
belki

# Mikromechanika powierzchniowa - fotolitografia

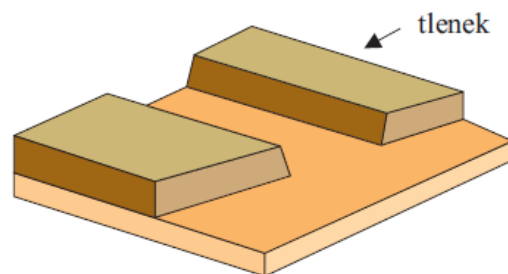


Proces trawienia Si  
poprzedzony jest  
fotolitograficznym  
naniesieniem wzoru  
(pattern transfer)

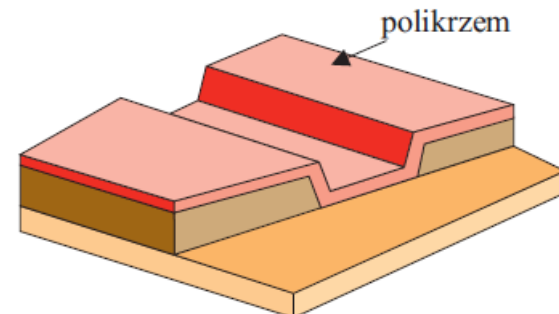
# Mikromechanika powierzchniowa - powstawanie belki polikrzemowej



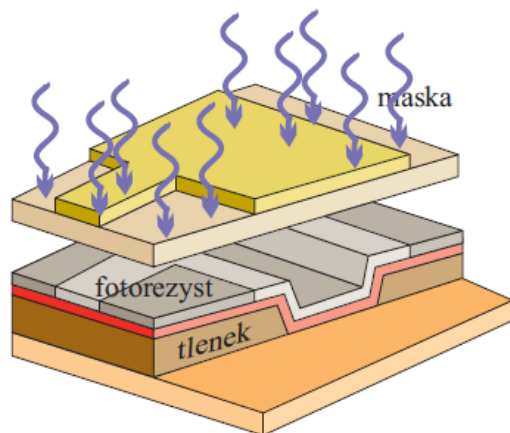
1. Naświetlenie fotorezystu



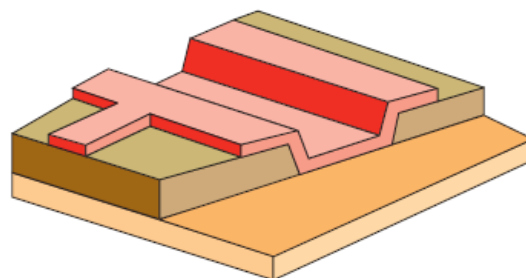
2. Usunięcie fotorezystu  
i trawienie tlenku



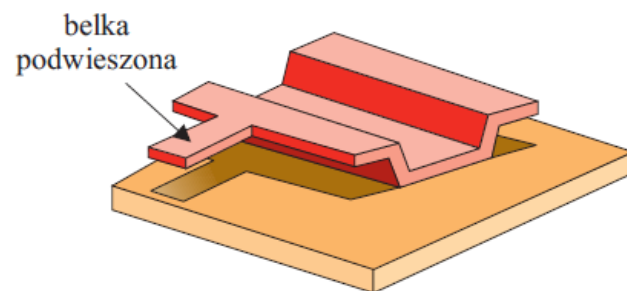
3. Naniesienie polikrzemu



4. Naświetlenie fotorezystu

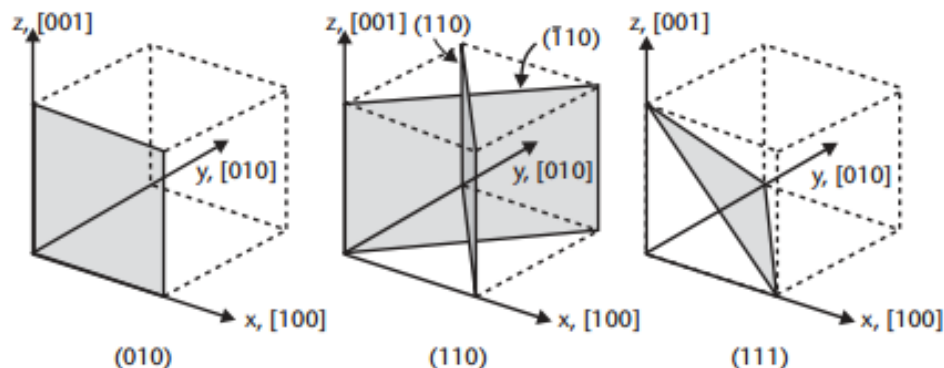


5. Usunięcie fotorezystu  
i trawienie polikrzemu

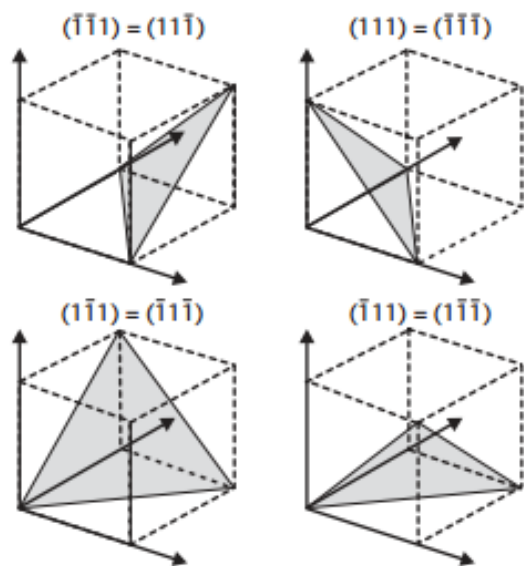


6. Trawienie tlenku poświęcanego

# Mikromechanika w krzemie – płaszczyzny krystalograficzne



(a)



(b)

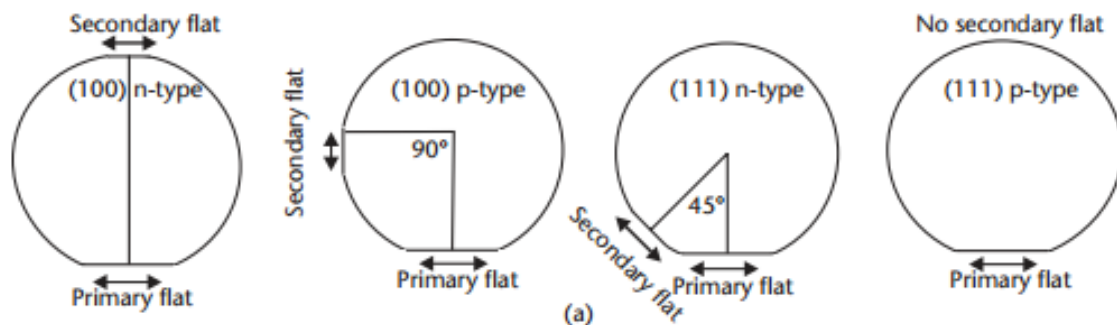
$\{110\}$  – zbiór płaszczyzn  
 $(110)$  – płaszczyzna  
 $[110]$  - kierunki

a) Trzy płaszczyzny krystalograficzne i odpowiadające im wskaźniki w kryształie sześciennym. Identyfikowane dwie płaszczyzny w zbiorze płaszczyzn  $\{110\}$

b) Cztery płaszczyzny w zbiorze płaszczyzn  $(111)$ .  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  i  $(111)$  to te same płaszczyzny.

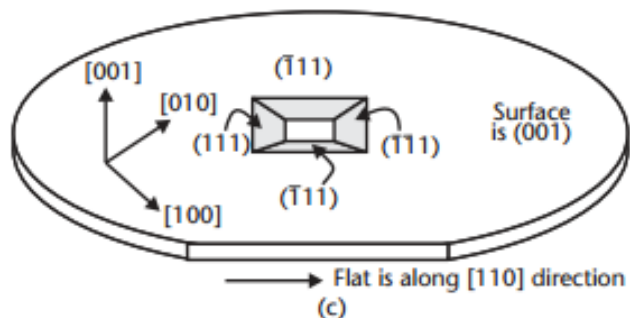
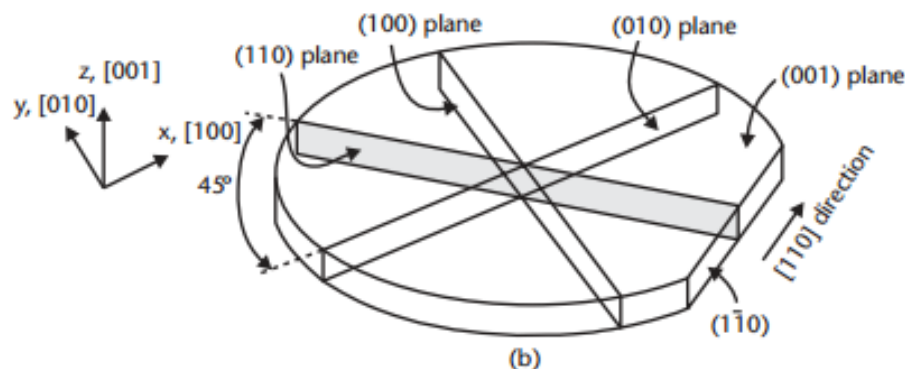


# Mikromechanika w krzemie – płaszczyzny krystalograficzne



Jak rozpoznać kierunki mając  
płytkę Si typu n lub p?

→ Ścięcia



# Mikromechanika powierzchniowa - trawienie

Trawienie głębokie to głównie tzw. trawienie mokre anizotropowe (o szybkości zależnej od orientacji krystalograficznej).

Możliwości z tego wynikające odkryto na początku lat 1980.

Stosując określone środki trawiące uzyskuje się w krzemie duże szybkości trawienia dla płaszczyzn (100) i (110), a znikomo małe dla (111).

Domieszkowanie Si borem powoduje gwałtowny spadek szybkości trawienia (dla koncentracji  $B > 2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  szybkość trawienia spada 3 rzędy wielkości). Jest to tzw. **stopowanie trawienia**.

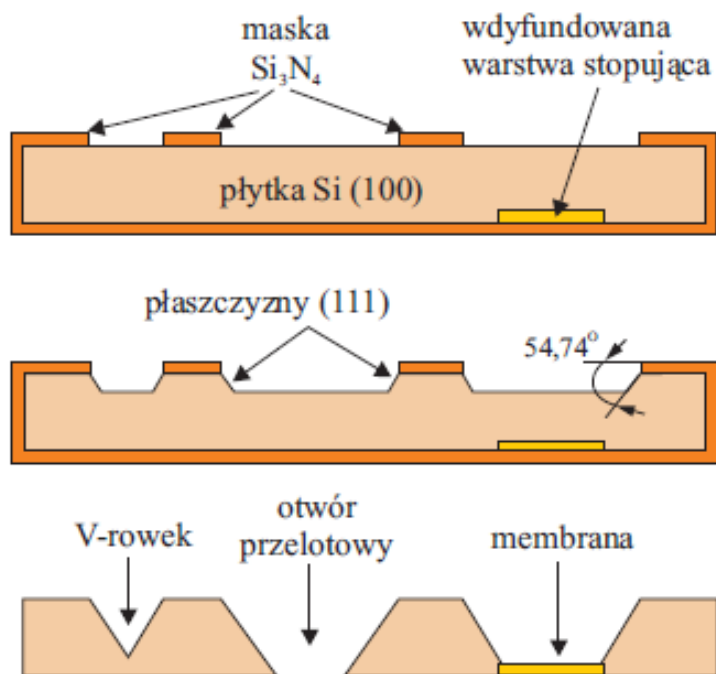
Selektywność trawienia można również uzyskać w procesie elektrochemicznym.

# Mikromechanika powierzchniowa – trawienie anizotropowe

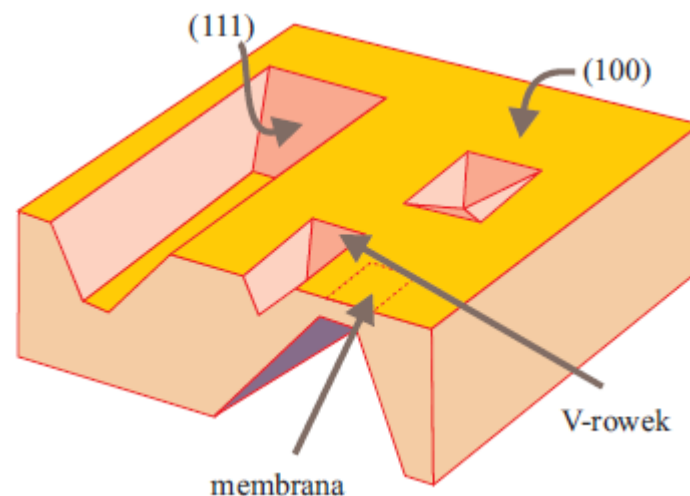
## Środki trawiące anizotropowo:

- KOH + woda

*środek b.selektywny, stosunek szybkości trawienia płaszczyzn  $\{100\}$  do  $\{111\}$  wynosi 200 : 1*

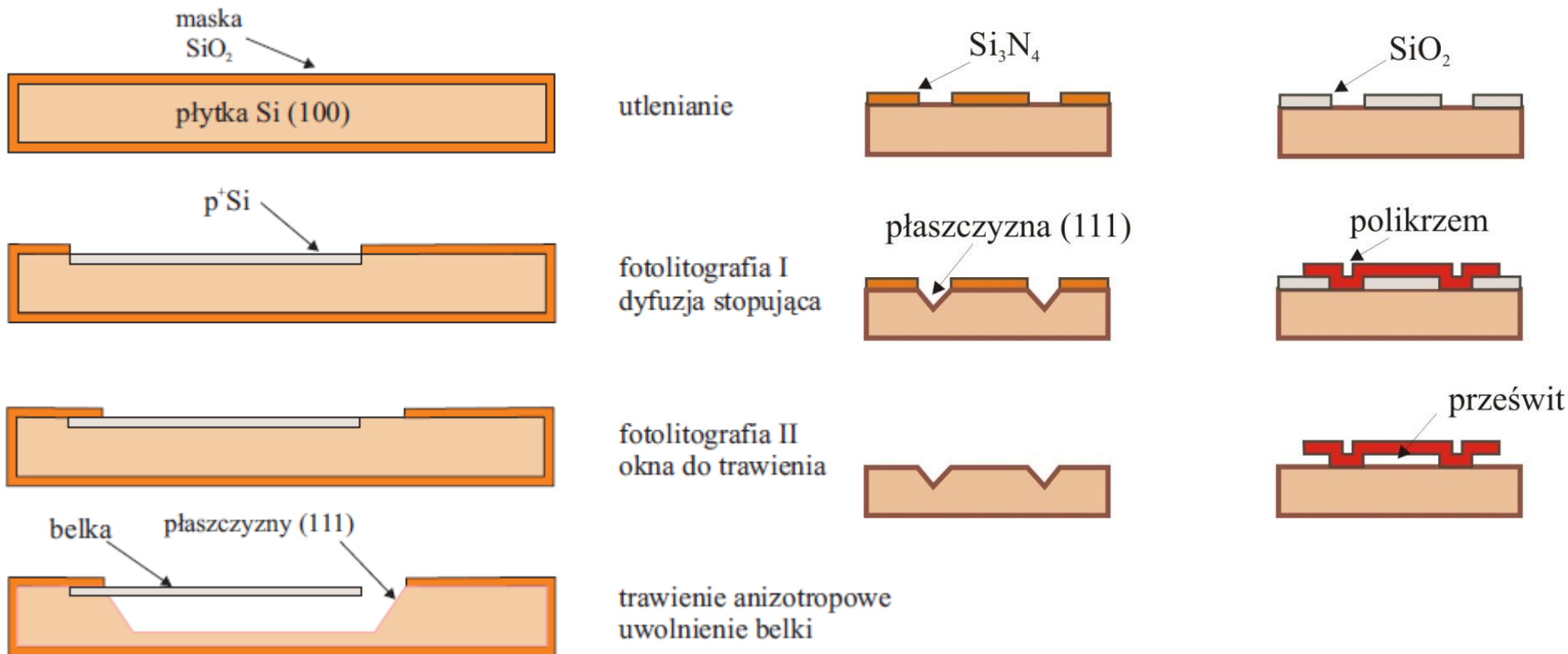


- EDP (etylenodiamina + pirokatechol + woda)  
*środek mniej selektywny, b. wolno trawiący  $\text{SiO}_2$  - zaleta*
- Hydrazyna + woda  
*duża szybkość trawienia  $\{100\}$ , selektywność mała ok. 10:1.*
- CsOH,  $\text{NH}_4\text{OH}$ , TMAH



Stopowanie trawienia: V-rowek lub dyfuzja p+

# Mikromechanika powierzchniowa – trawienie anizotropowe



Etapy wytwarzania belki krzemowej jednostronnie  
podpartej w trawieniu anizotropowym



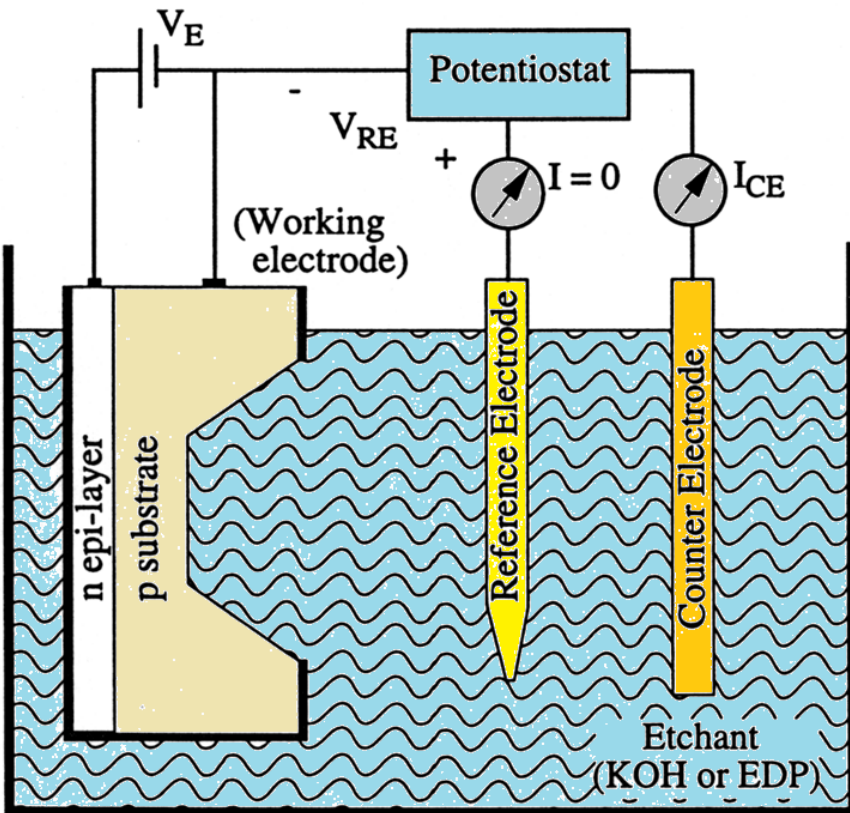
# Mikromechanika powierzchniowa – trawienie elektrochemiczne

Szybkość trawienia zależy od różnicy potencjałów między próbką i środkiem trawiącym.

$V_{RE}$  dobrane tak, aby zachodziło trawienie podłoża.

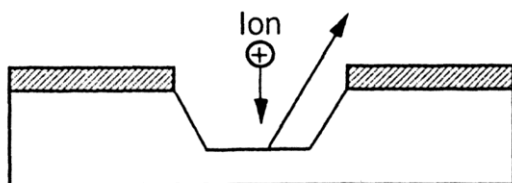
Potencjał epiwarstwy  $V_{RE} + V_E$  dobrany tak, aby był powyżej „progu pasywacji” n-Si.

Trawienie zatrzymuje się na warstwie epitaksjalnej, tworząc warstwę pasywacyjną.



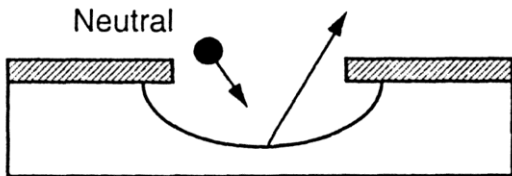
# Mikromechanika powierzchniowa – trawienie suche

## Trawienie suche (w plaźmie gazowej)



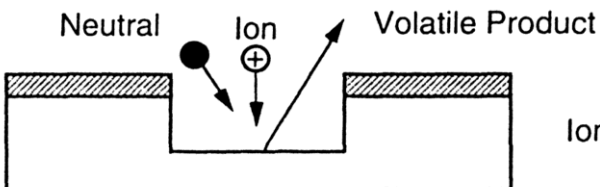
Sputtering

Jony Ar, O<sub>2</sub>



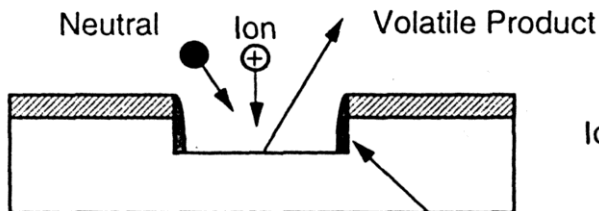
Chemical

CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>



Ion-Enhanced  
Energetic

RIE



Ion-Enhanced  
Inhibitor

Inhibitor

Trawienie plazmowe (Plasma etching) jest procesem czystym, bardzo użytecznym w przypadku, gdy nie można stosować trawienia mokrego.

# Mikromechanika powierzchniowa – trawienie izotropowe

## Izotropowe trawienie cienkich warstw

Przykłady środków trawiących dla wybranych cienkich warstw:

Si:  $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

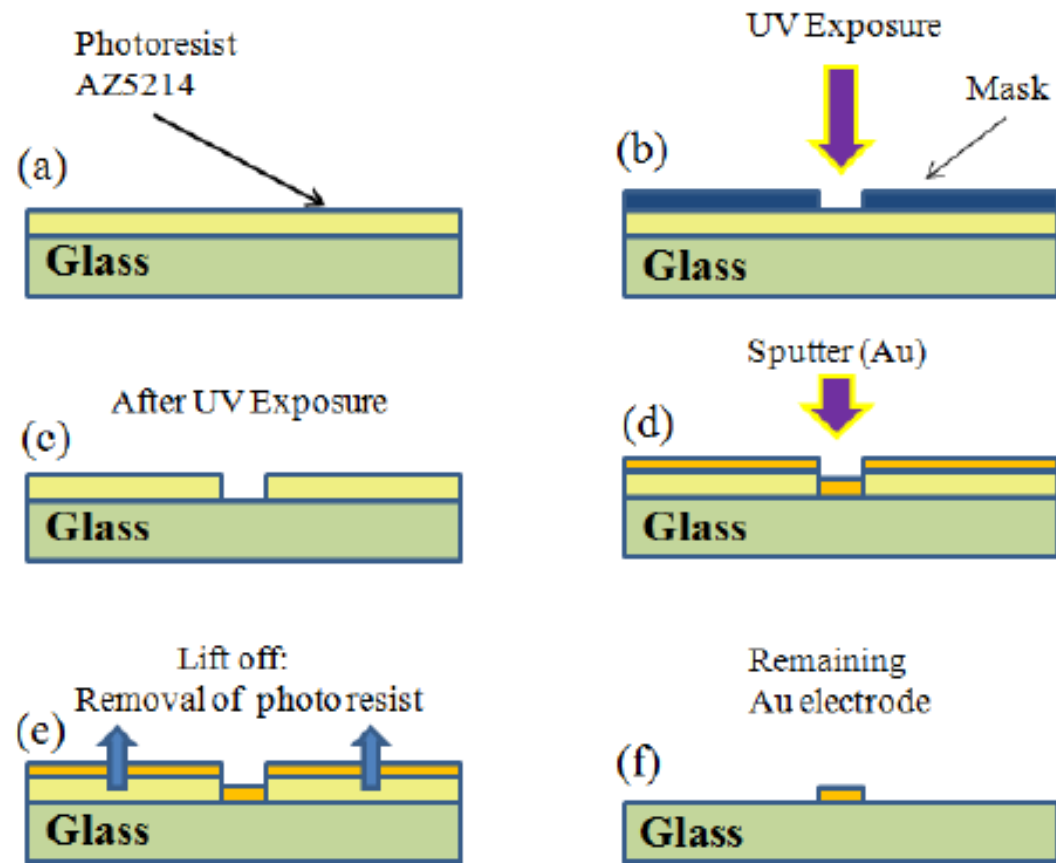
$\text{SiO}_2$ :  $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$

$\text{Si}_3\text{N}_4$ :  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Al: trawienie plazmowe lub reaktywne jonowe

Warstwy Au, Pt nie są trawione, ale kształtowane w tzw.  
*procesie lift-off*.

# Mikromechanika powierzchniowa – proces lift-off



Fotorezyst

(a) jest nasączony przed ekspozycją  
(b) w chlorobenzenie, w wyniku czego warstwa wierzchnia jest słabiej rozpuszczalna w wywoływaczu.

(c) usunięcie naświetlonego fotorezystu

(d) naparowanie metalu (Au)

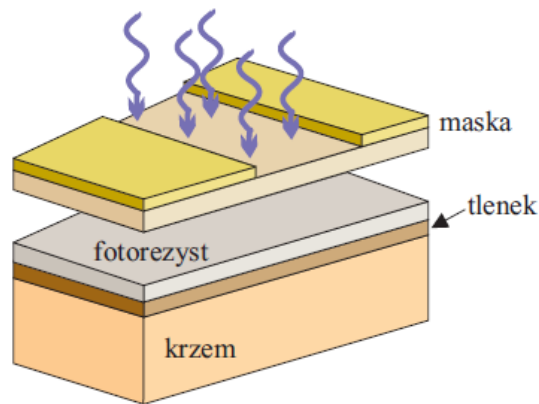
(e) usunięcie nie naświetlonego fotorezystu wraz z metalem

Uzyskano wzór ścieżki metalicznej bez trawienia metalu (f).

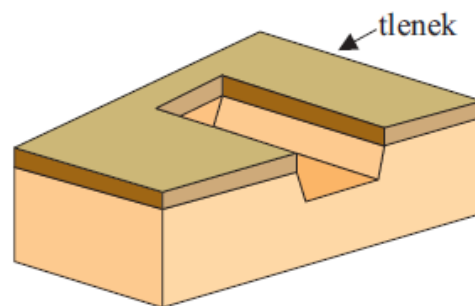


# Mikromechanika objętościowa

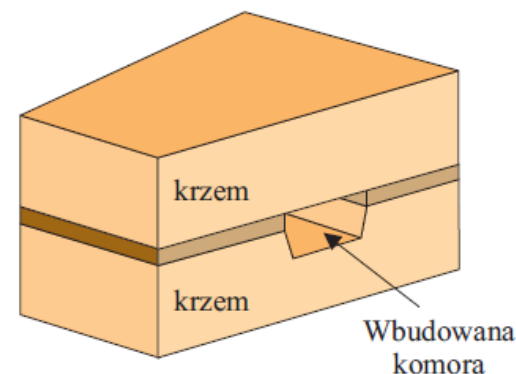
## - powstawanie belki zawieszonej i komory



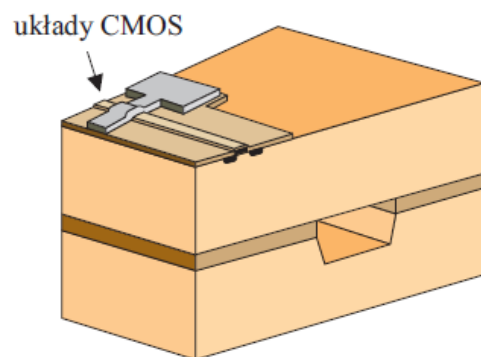
1. Naświetlanie fotorezystu



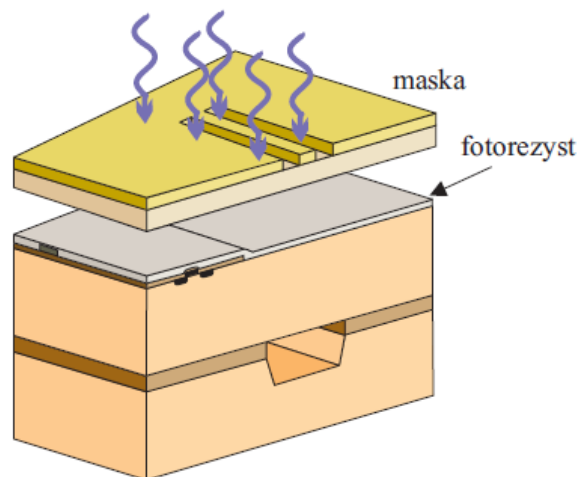
2. Trawienie komory



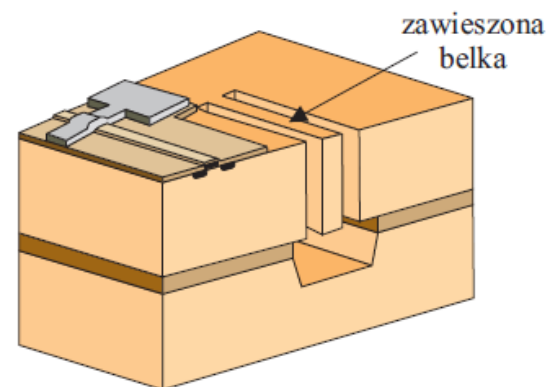
3. Bonding krzemu i tlenku



4. Wytworzenie układu CMOS

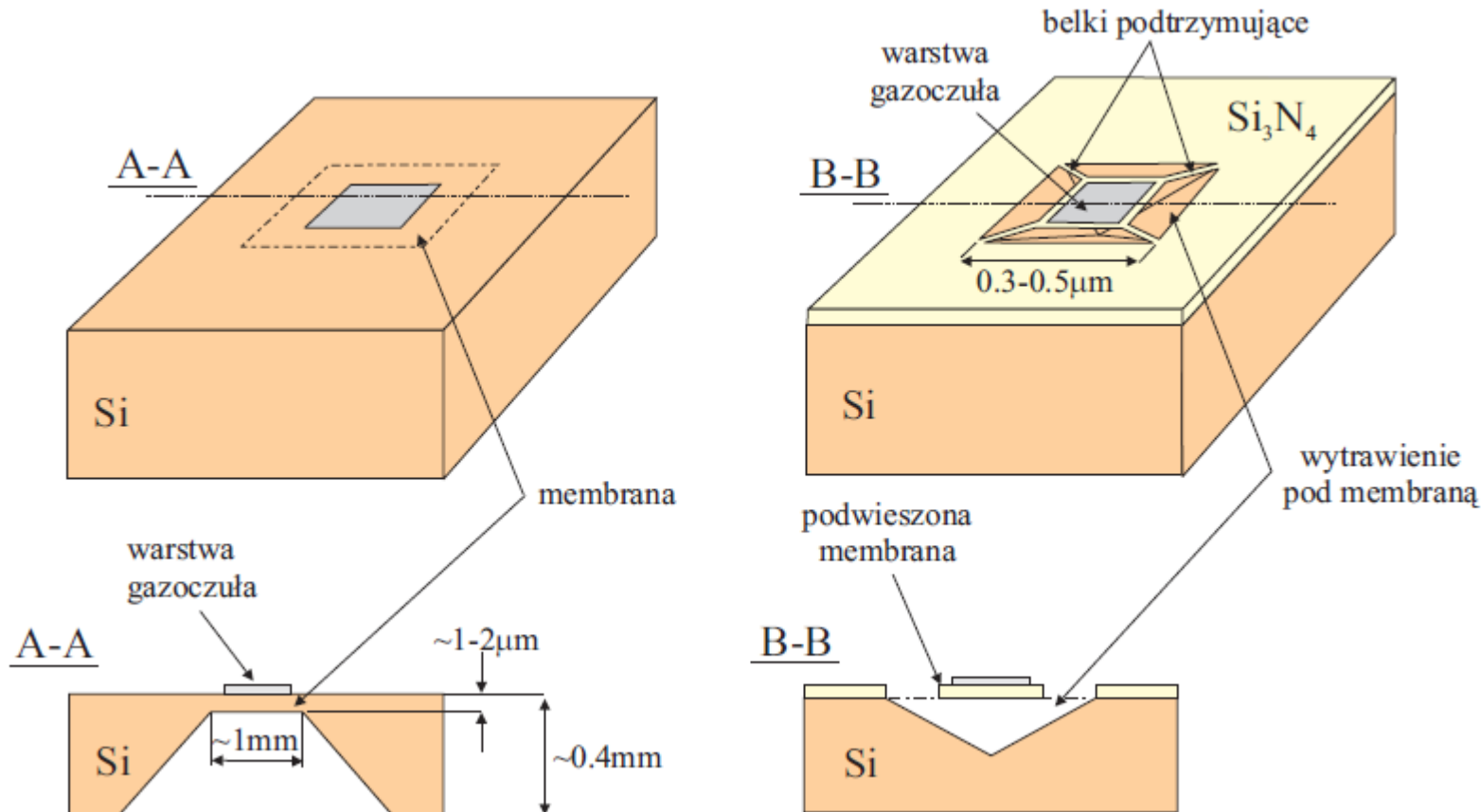


5. Naświetlanie fotorezystu



6. Trawienie (DRIE)

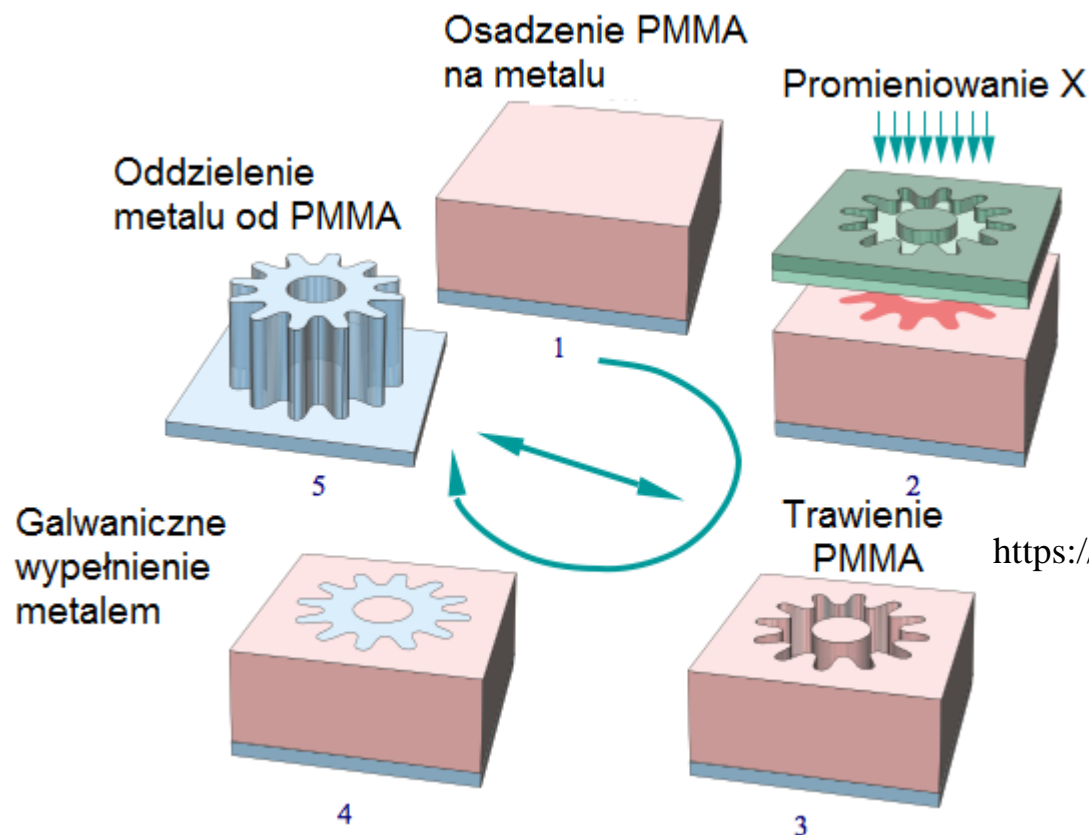
# Technologia mikromechaniczna – typy membran



Typy membran spotykane w czujnikach mikromechanicznych:  
zamknięta (a) oraz podwieszona typu pająk (*hotplate*, *spider*) (b)

# Technologia LIGA – etapy technologiczne

**LIGA** (niem. *Lithographie, Galvanoformung, Abformung* —  
litografia, galwanoplastyka, formowanie)

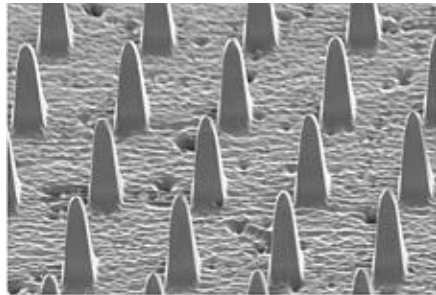


Wysoka cena  
technologii

<https://www.youtube.com/watch?v=CbN7h3o51Zo>

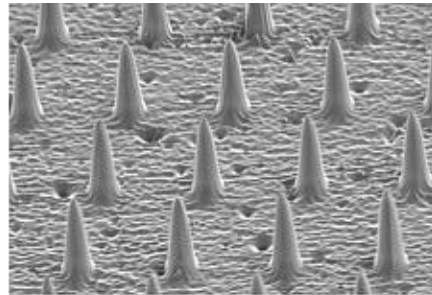
(→ FILM)

# Technologia LIGA – zastosowania



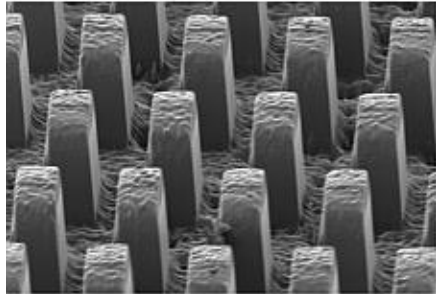
(a)

50  $\mu\text{m}$



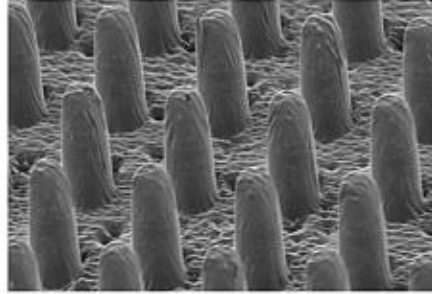
(b)

50  $\mu\text{m}$



(c)

50  $\mu\text{m}$

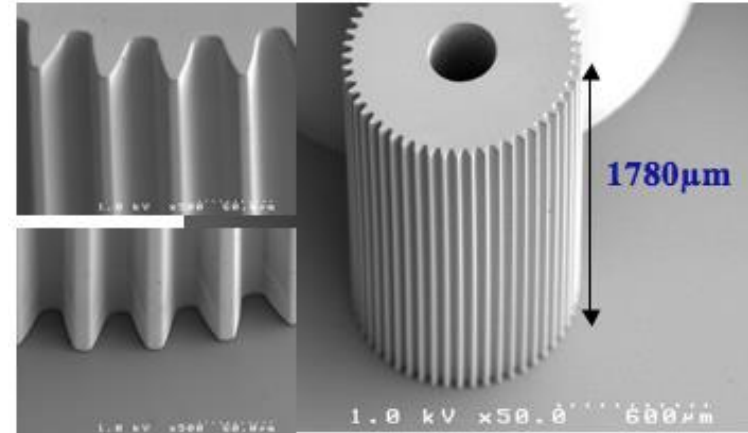


(d)

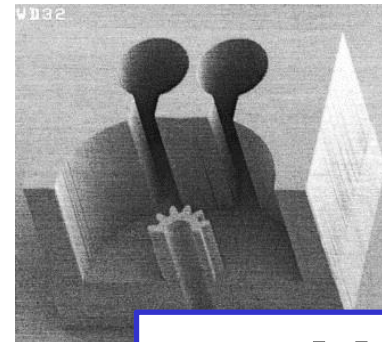
50  $\mu\text{m}$

*J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 8(3), 033010 (July 01, 2009).  
doi:10.1117/1.3158617*

Wytwarza się w niej miniaturowe metalowe  
(Ni) kółka zębate, walce, mikroigły itd.



<http://www.memsnet.org/mems/fabrication.html>



Możliwość  
wytwarzania wysokich  
elementów

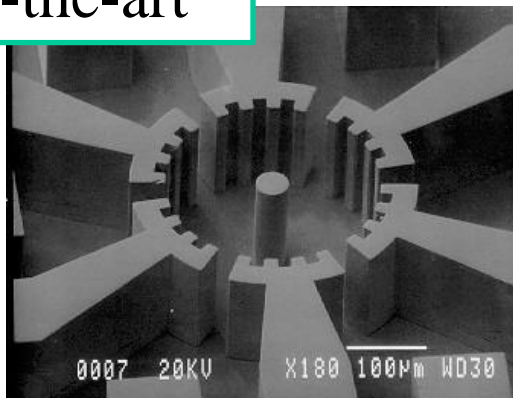


# Technologia EFAB – dlaczego?

„State-of-the-art”



Mikromechanika  
powierzchniowa



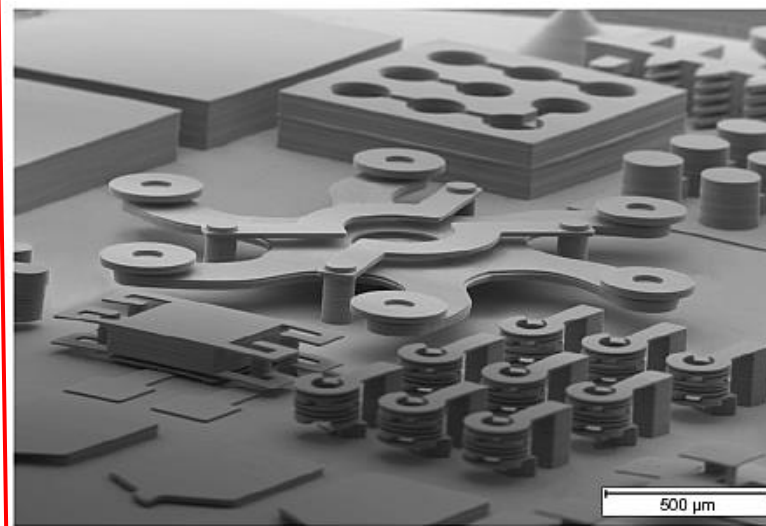
LIGA

**Wady:** ograniczone geometrie, mnóstwo masek i procesów, długi czas wprowadzenia produktu na rynek, wymagana znajomość wytw. MEMS, brak standardów (każde nowe urządzenie – nowe procesy), kłopotliwe łączenie z elektroniką

← ...setki masek,  
ogromne koszty

?

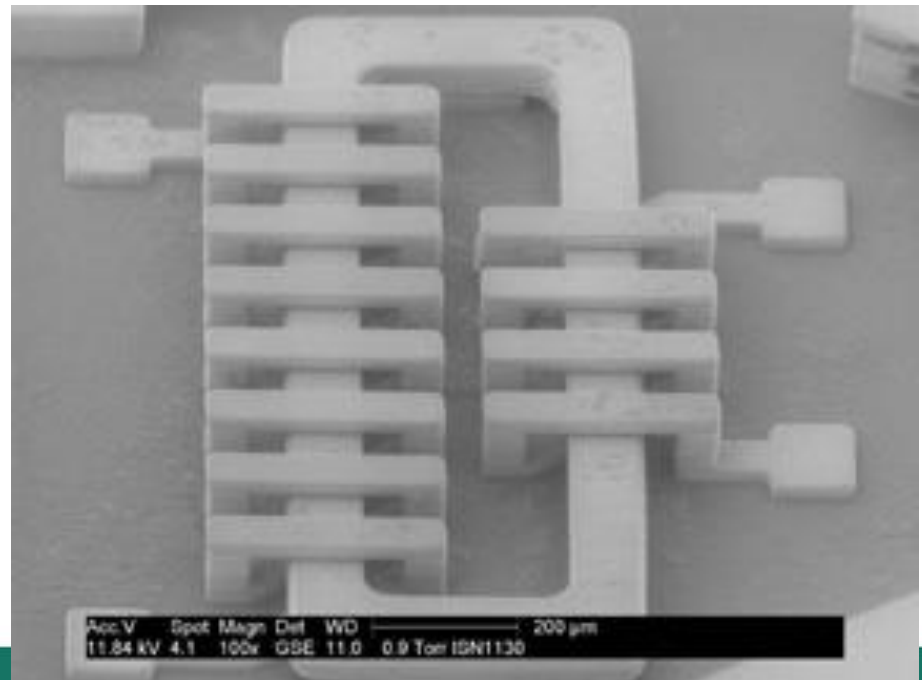
EFAB



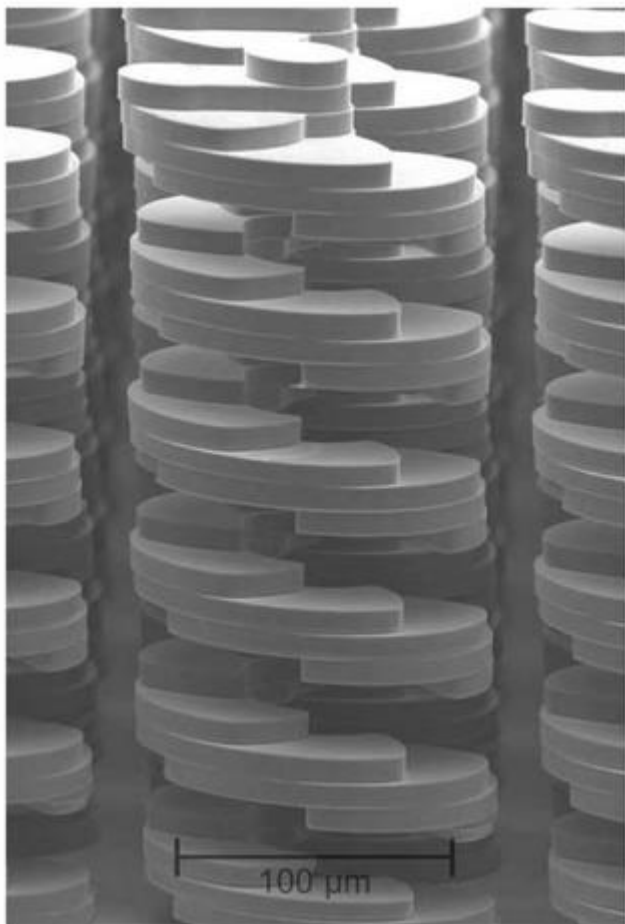
# Technologia EFAB

- Szybkie przejście od modeli 3D CAD (WYSIWYG) reprezentujących urządzenie („wiem, jak coś ma działać; nie znam technologii”) do prototypu urządzenia.
- Możliwe szybkie wytworzenie mikrourządzeń, których wcześniej nie dało się wytworzyć.**

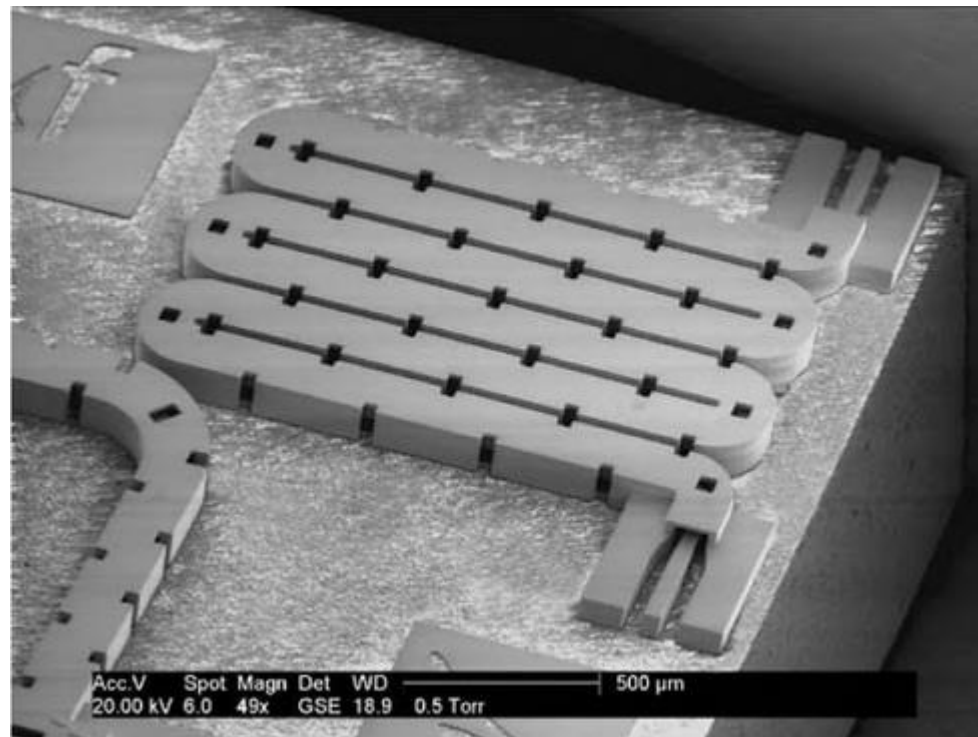
23-warstwowy transformator  
zbudowany w EFAB na  
podłożu izolowanym  
(**MEMGen Corporation**)



# Technologia EFAB

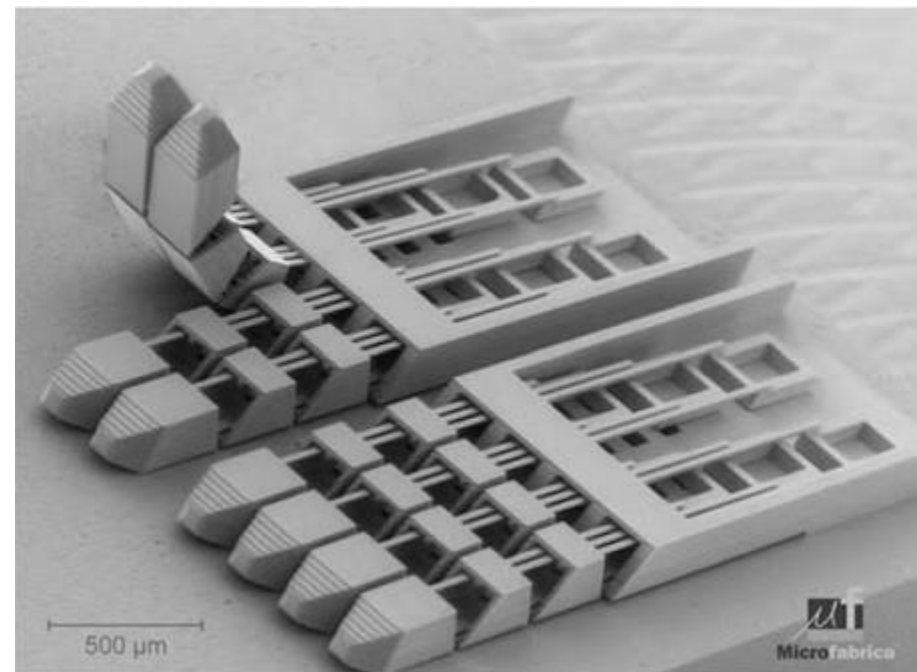
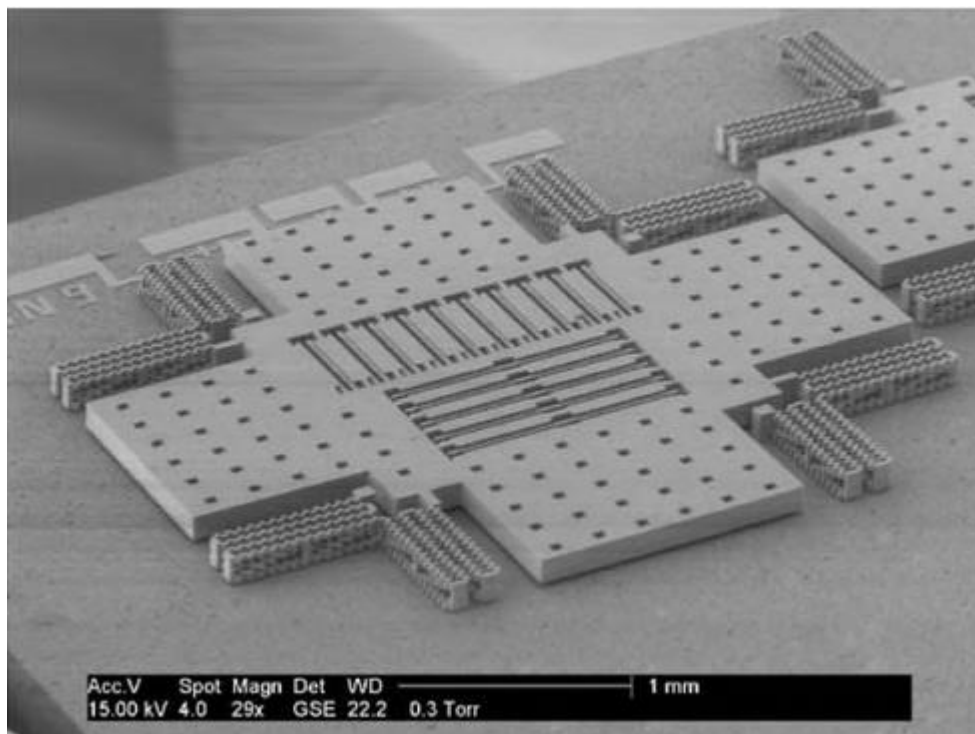


mikrosprężyna – 36 warstw



Mikrolinia koaksjalna opóźniająca  
RF (30 GHz) - 1cm długości

# Technologia EFAB



Akcelerometr 2-osiowy

Mikropalce aktywowane  
„ścięgnami” - 1 mm szerokości

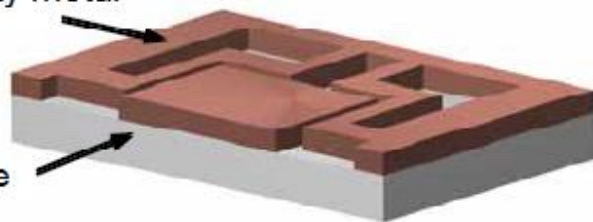


# Technologia EFAB - procesy

(a) Osadzanie wzorca

Pierwszy metal

Podłoże



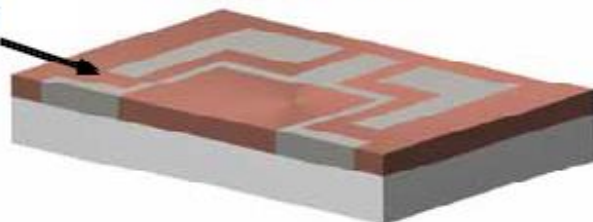
(b) Osadzanie pokrycia

Drugi metal



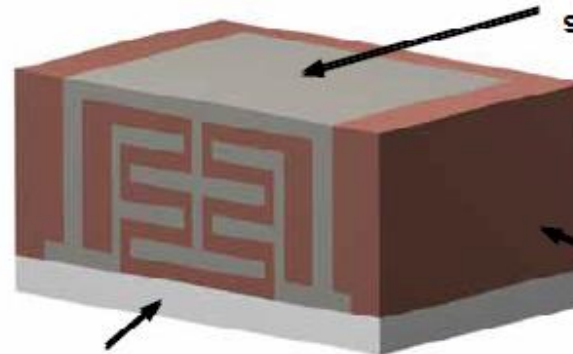
Zakończona  
pierwsza  
warstwa

(c) Planaryzacja



(d) Po  $n$  warstwach

Materiał  
strukturalny

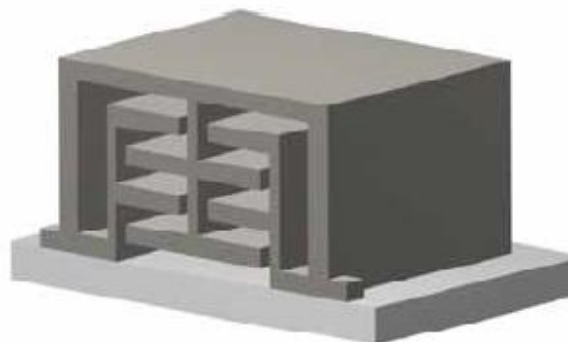


Podłoże

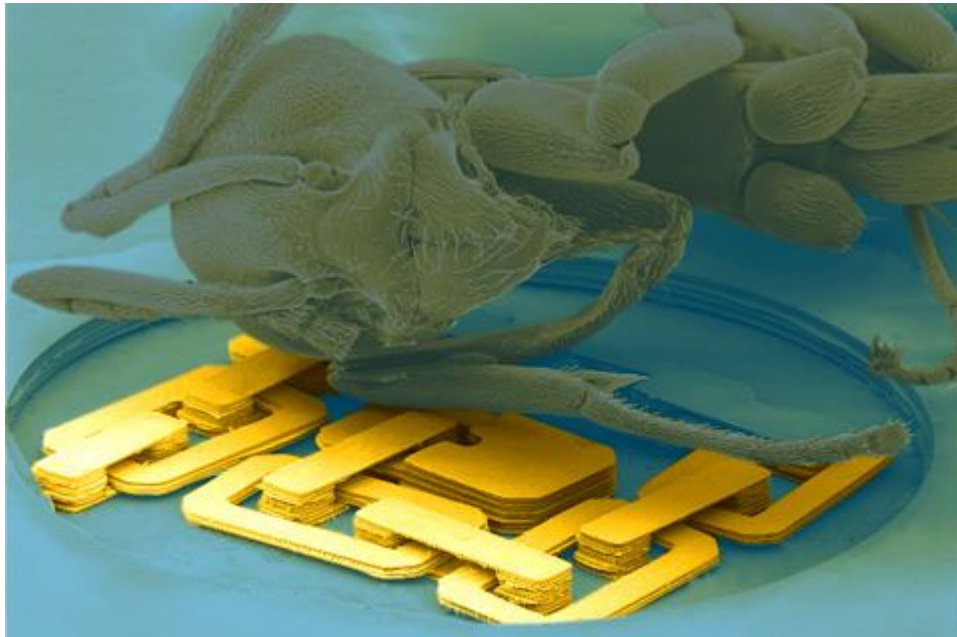
Materiał  
poświęcany

(e) Struktura finalna

Po wytrawieniu warstwy poświęcanej



# Technologia EFAB



*„Relative to conventional micromachining, no customer's design is too complex and no part is too small”*

from Microfabrica website

W porównaniu z konwencjonalną mikroobróbką żaden projekt klienta nie jest zbyt skomplikowany i żadna część nie jest zbyt mała

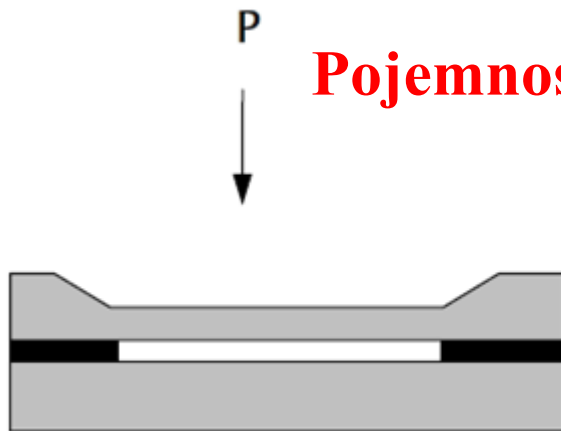
Mrówka leżąca na 12-warstwowym mikrołańcuchu z niezależnie poruszanymi ogniwami. Wysokość ~100um (grubość kartki papieru)

Materiał: nikiel.

Pojedynczy proces

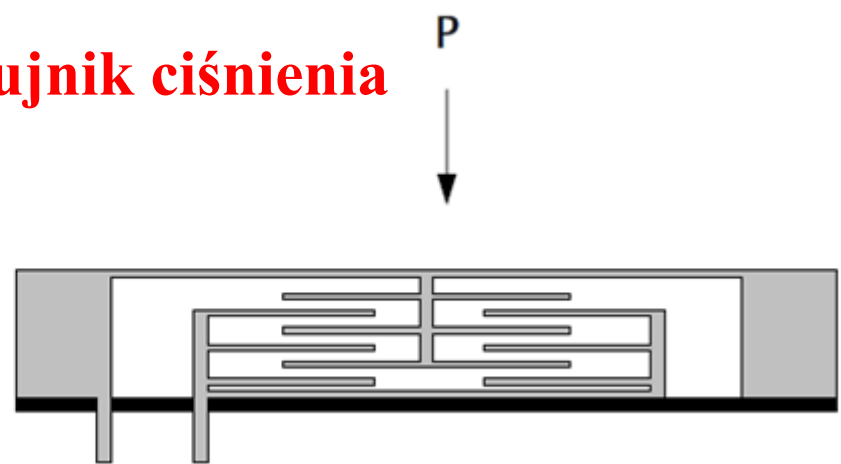
# Technologia EFAB

## Pojemnościowy czujnik ciśnienia



### Technologia MEMS

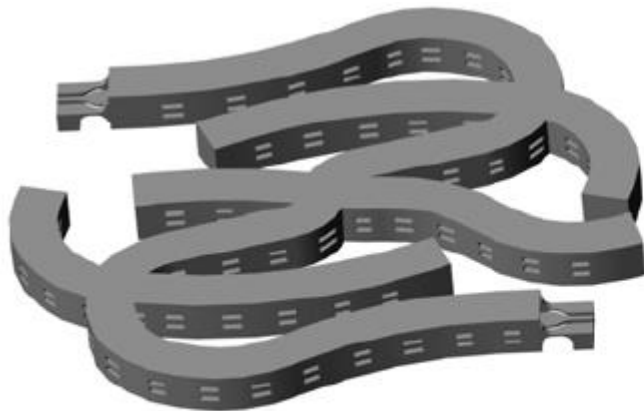
- Zawiera dwie płytki Si, które muszą być zbondowane (połączone spoiwem)
- Wymaga obudowy



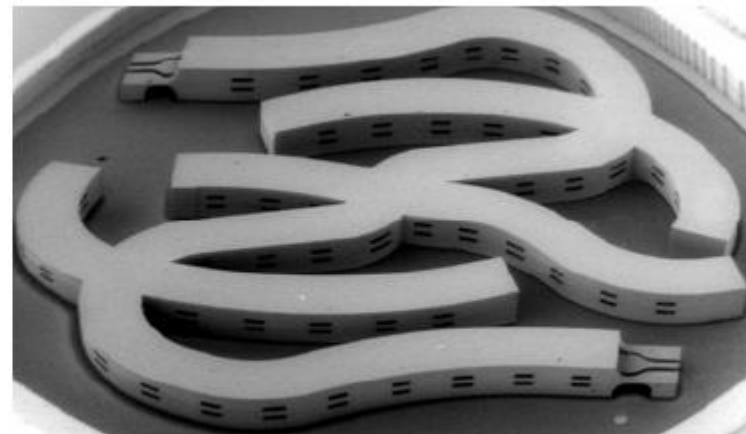
### Technologia EFAB

- Większa powierzchnia aktywna, większa pojemność
- Konstrukcja 3D
- „Obudowa samopakująca”

# Technologia EFAB



3-D cad model



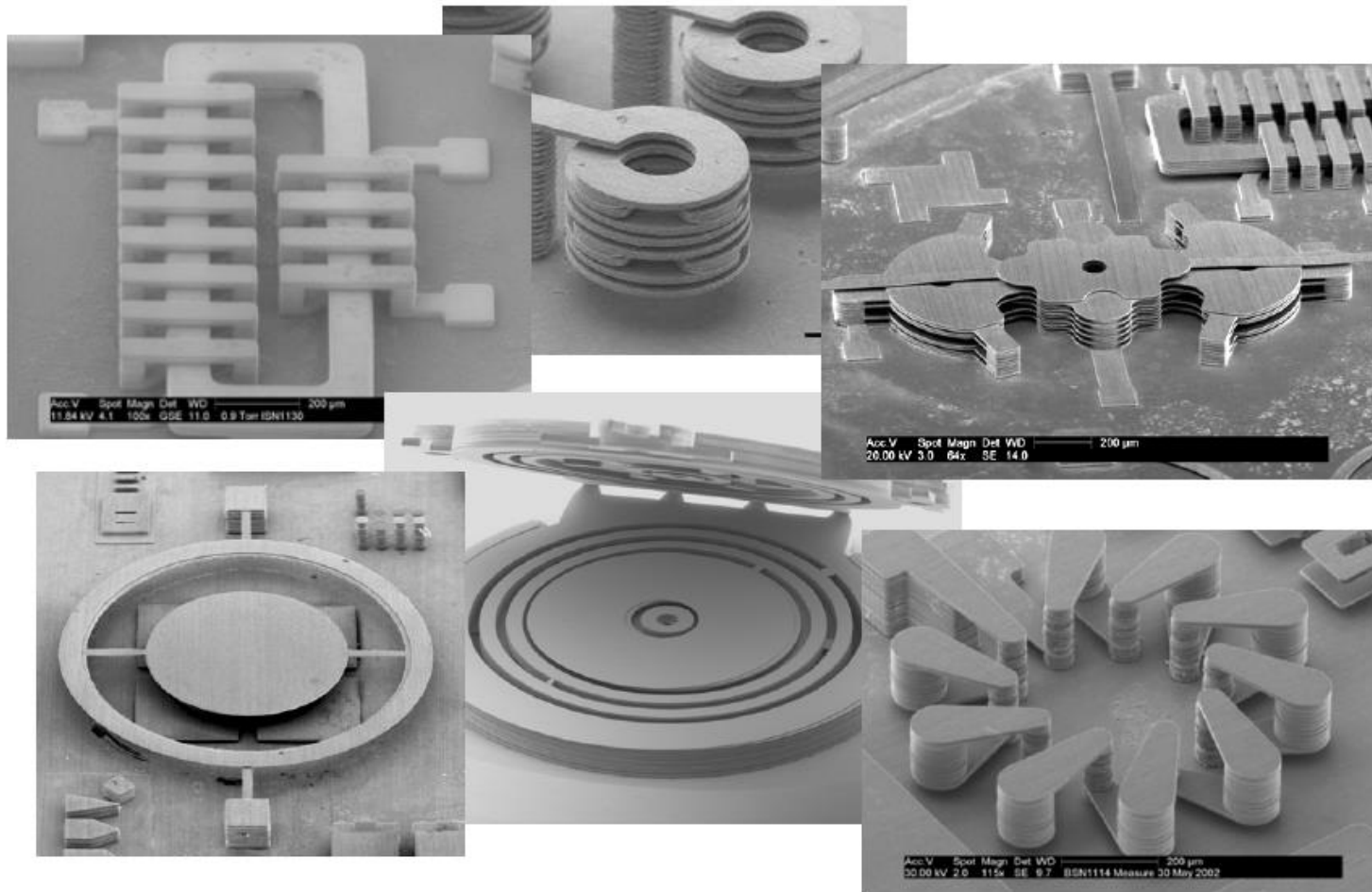
SEM Photo

EFAB: model i wykonanie urządzenia RF na 30 GHz

Fale EM o dużych częst. są bardzo wrażliwe na geometrię przewodnika – wpływ na propagację.

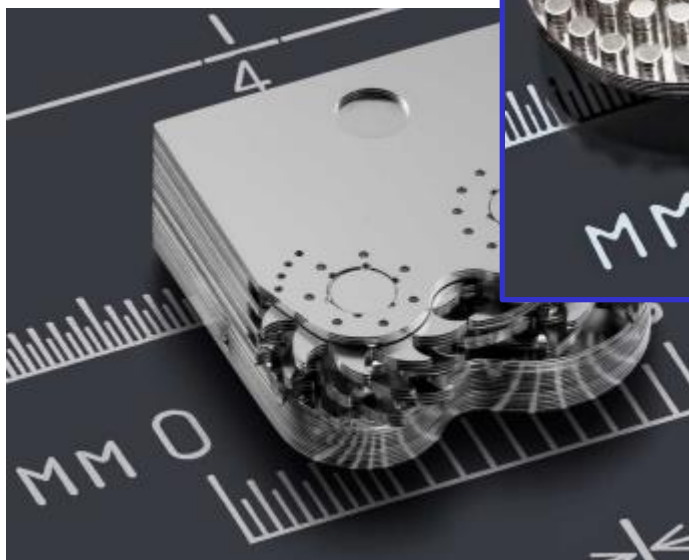
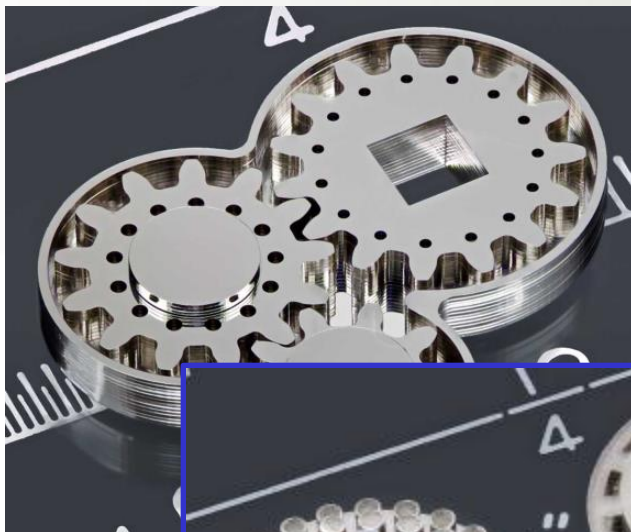
Za pomocą EFAB można tworzyć linie transmisyjne, sprzęgacze, linie opóźniające, anteny, filtry.

# Technologia EFAB



EFAB: model i wykonanie urządzenia RF na 30 GHz





# Materiały dodatkowe, źródła

- W. Maziarz, *Współczesne czujniki ciśnienia, Elektronik 1* (2002) 45–49.
- N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, Inc., Boston, 2000.
- M. Gad-el-Hak, (red.), *The MEMS handbook, The Mechanical Engineering Handbook Series*. CRC Press, Boca Raton, 2002.
- S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft i N. White, *MEMS Mechanical Sensors, Microelectromechanical Systems (MEMS) Series*. Artech House, Inc., Boston, 2004.
- J. Dziuban, *Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo-szklanych w technice mikrosystemow*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- J. M. Łysko, *Anizotropia trawienia i piezorezystancji w kryształach półprzewodników. Przykłady wykorzystania w przyrządach MEMS*, Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa, 2004.
- Michael A. Cullinan i inni, *Scaling electromechanical sensors down to the nanoscale*, Sensors and Actuators A 187 (2012) 162– 173
- <http://mems.sandia.gov/about/actuators.html>
- <http://www.bacteria-world.com/what-are-mems.htm>
- <http://e-fab.com/>
- <http://www.dei.uminho.pt/pessoas/biomedica/ultra/01258171.pdf>
- FILM: metoda LIGA - [http://www.youtube.com/watch?v=oI0Hgo\\_dmsg](http://www.youtube.com/watch?v=oI0Hgo_dmsg)
- <http://www.memsnet.org/mems/fabrication.html>