

Systemy mechatroniczne

- klasyczne systemy mechatroniczne
- **systemy mikroelektromechaniczne MEMS**
- systemy nanoelektromechaniczne NEMS

Systemy mikroelektromechaniczne MEMS

1. Ogólna charakterystyka
2. Technologia wytwarzania
3. Przykłady zastosowań

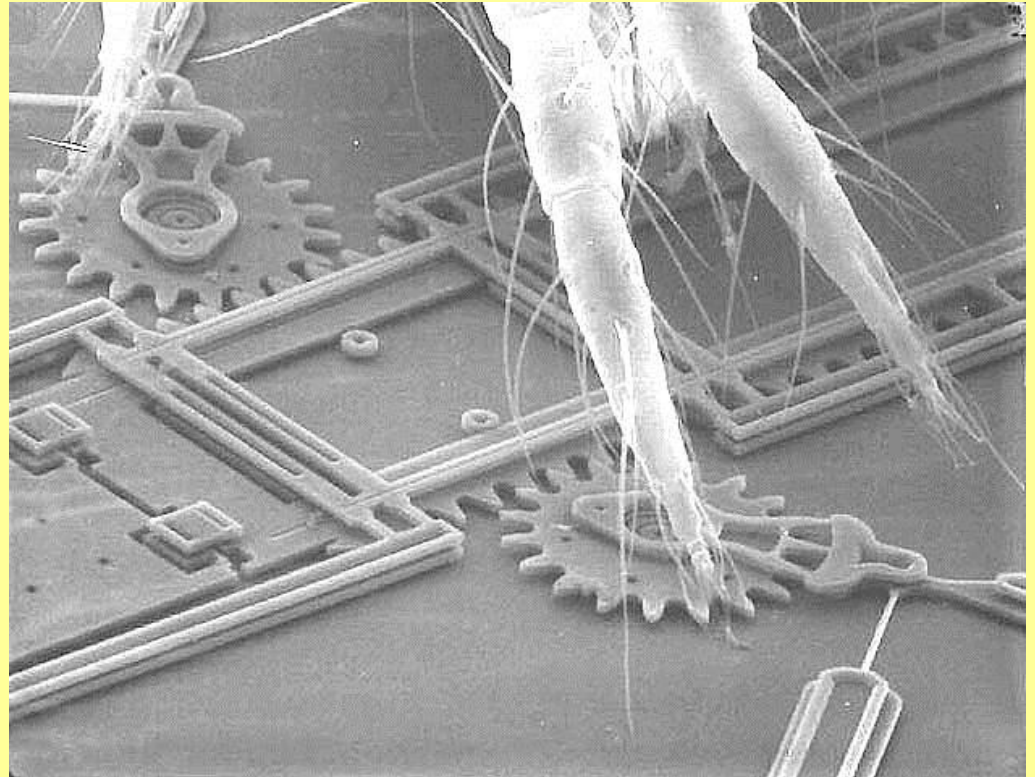
Systemy mikroelektromechaniczne MEMS

1. **Ogólna charakterystyka**
2. Technologia wytwarzania
3. Przykłady zastosowań

MEMS

MEMS są zbudowane z elementów (*czujników, nastawników, itp.*), których wymiary zawarte są pomiędzy **1** to **100 mikrometrów**, tj. od 0.001 do 0.1 mm.

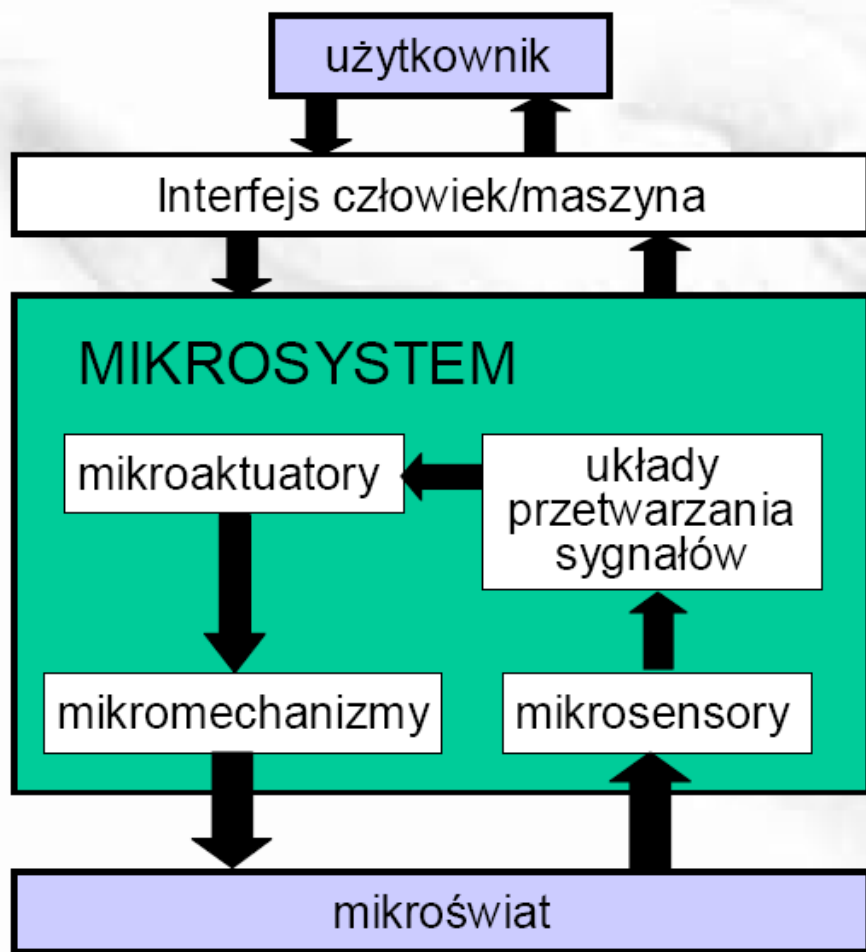
Systemy MEMS mają wymiary w zakresie od **20 mikrometrów** (*20 milionowa część metra*) do **1 milimetra**.



*nogi pająka na tle napędu typu
MEMS*

Zarys historii MEMS

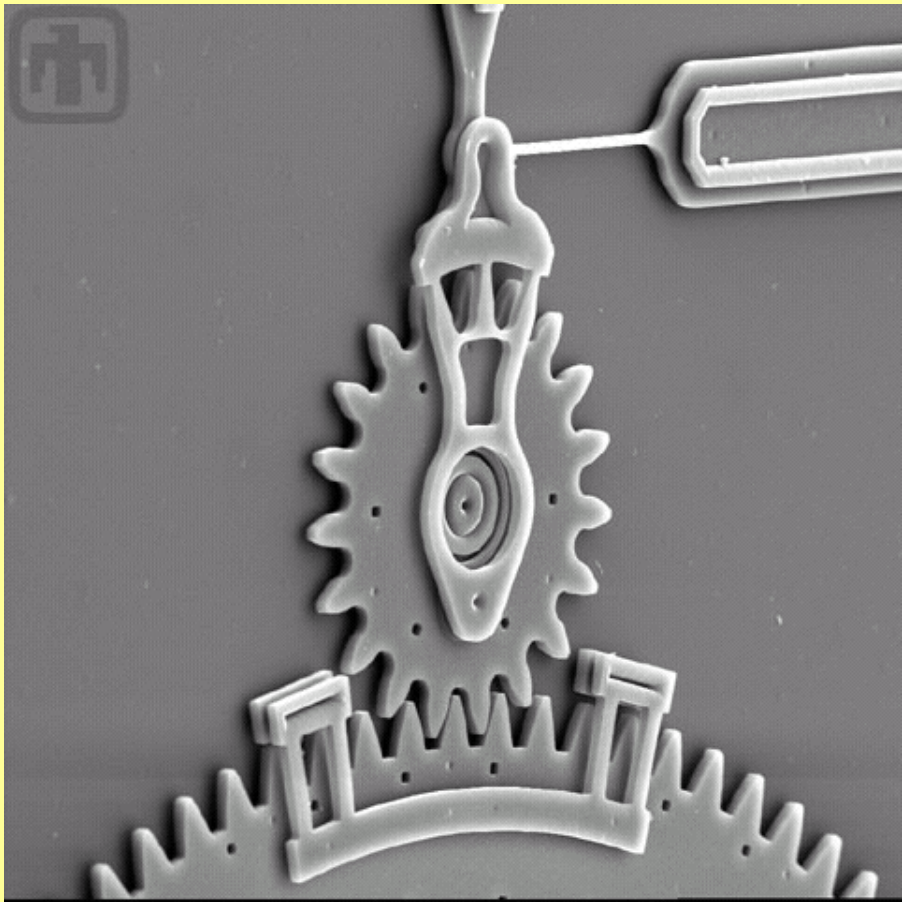
- 1962 Silicon Integrated piezo actuators by O.N. Tufte et al.
- 1967 Anisotropic deep silicon etching by H.A. Waggener
- 1967 The resonant gate transistor by H. Nathanson, et.al
- 1972 National Semiconductor - Pressure Sensor
- 1979 Thermal inkjet technology is invented at HP laboratories
- 1982 “Silicon as a Mechanical Material” K. Peterson
- 1982 Liga Process (KFIK, Germany)
- 1983 “Infinitesimal Machinery” R. Feynman
- 1983 Silicon Micromechanical devices – J.B. Angel etc.
- 1983 Integrated Pressure Sensor – Honeywell
- 1985 Airbag Crash Sensor
- 1987 Dr. Hornbeck Digital Micromirror Device or DMD (DLP by Texas Instruments)
- 1993 Accelerometer integrated with electronics Analog devices
- 1994 DBIE Etching (Bosch process is patented)



MEMS składa się z:

- mikrosensorów,
- mikroaktuatorów,
- mikroprocesorów.

Mikrosystem przetwarza także materię, nie tylko informacje



Mikrosystem to zestaw małych, inteligentnych przyrządów, który potrafi nie tylko myśleć, ale także wyczuwać, działać i komunikować się. Może nawet wiedzieć, gdzie jest i co się naokoło niego dzieje.



Detekcja



Analiza



Akcja

Unikalne właściwości Mikrosystemów (1) - wielkie wyzwania dla inżynierów

- Komponenty mają mikrometrowe wymiary i złożoną geometrię:

Mikro-przekładnia z
Sandia National Laboratories

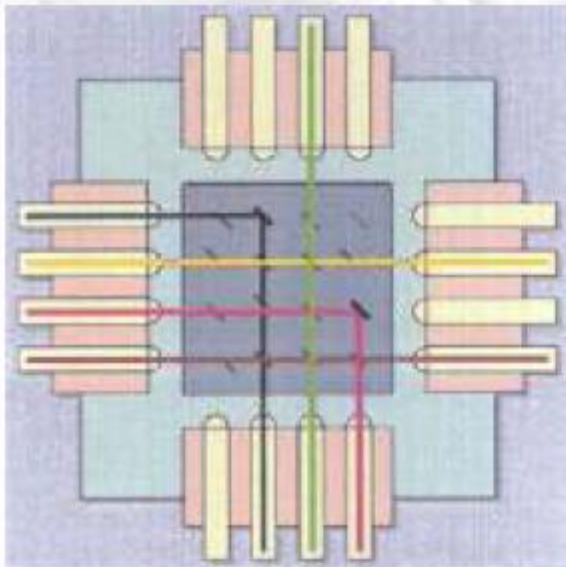


25 μm

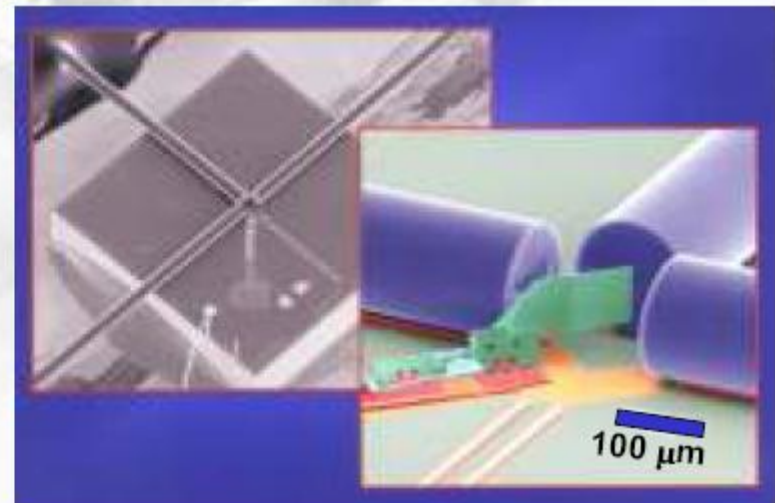
Unikalne właściwości Mikrosystemów (2) - wielkie wyzwania dla inżynierów

- Oczekuje się realizacji wyrafinowanych funkcji elektromechanicznych:

Sieć światłowodowa 2-D:

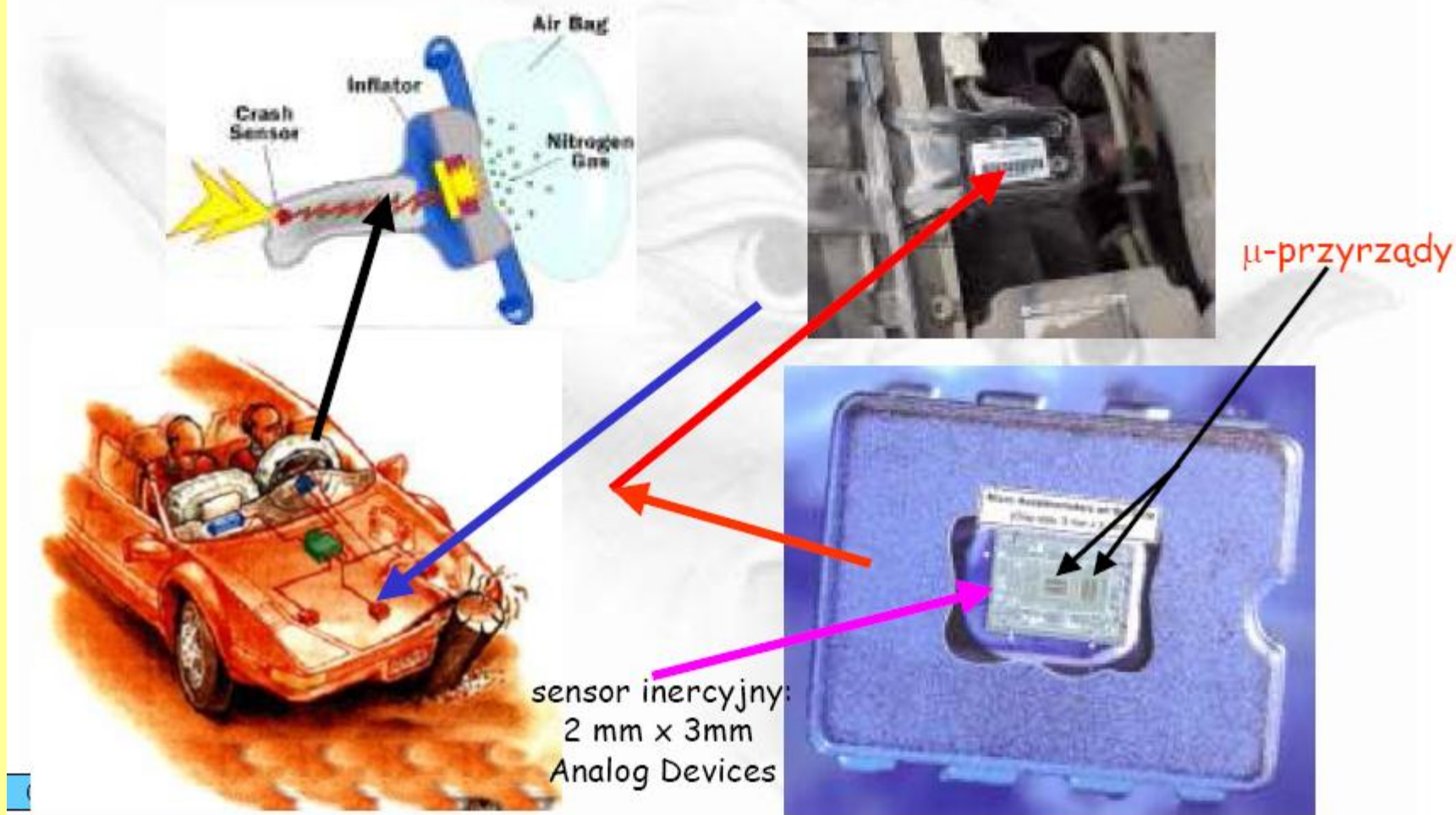


Mikroprzełącznik 2-D dla sieci światłowodowych z Lucent Technologies:



Unikalne właściwości Mikrosystemów (3) - wielkie wyzwania dla inżynierów

- Większość mikrosystemów potrzebuje przetwarzania sygnałów - potrzeba integracji mikroelektroniki i mikrostruktur:



Unikalne właściwości Mikrosystemów (4) - wielkie wyzwania dla inżynierów

- Niezbędny jest kontakt z roboczym medium
- często są to media nieprzyjazne środowiskowo
(ciepło, chemikalia, środowisko biologiczne, wilgotność, etc.)

Mikro-czujniki ciśnienia:



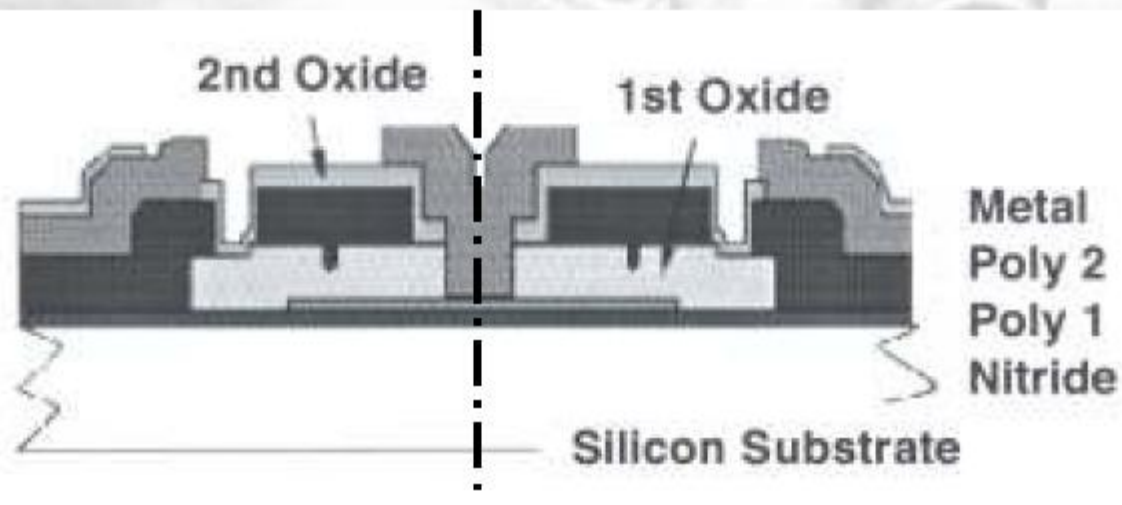
Czujnik ciśnienia dolotowego:



Unikalne właściwości Mikrosystemów (5) - wielkie wyzwania dla inżynierów

- Wielkość mikrosystemów jest konstruowanych z wielu warstw różnych materiałów
 - kompatybilność cieplna, ścinanie międzywarstwowe, delaminacja, etc.

Przekrój mikrosilnika elektrostatycznego:



Sensory MEMS Boscha dla zastosowań motoryzacyjnych

Czujniki inercyjne

Gyroskopy
(detekcja dachowania, Nawigacja)



Akcelerometry
(poduszki gazowe, ESP)



Czujniki „szybkości zbaczenia”
(dla systemów ESP)



Czujniki ciśnienia

MAP
(ciśnienie powietrza w kolektorze dolotowym)



BAP
(ECU silnika)



High Pressure
(Common Rail, GDI, hamulce)



Czujniki media + waga

iBolt™ (waga pasażera)



Sterowanie klimatyzacją

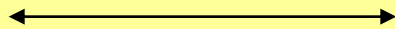
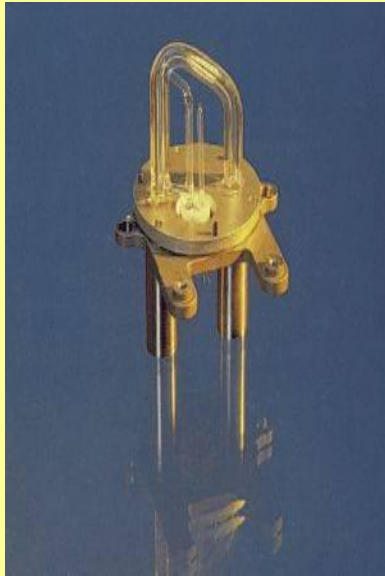


Jakość oleju

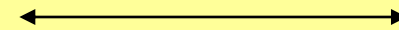
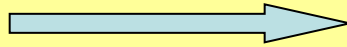


Wielkość produkcji w 2006: ponad 130 milionów czujników

Konwencjonalne
projektowanie



100 mm



1 mm

MEMS
projektowanie

Co oferują MEMSy



WIĘCEJ

szybkość

funkcje

MNIEJ

moc

ciężar

cena

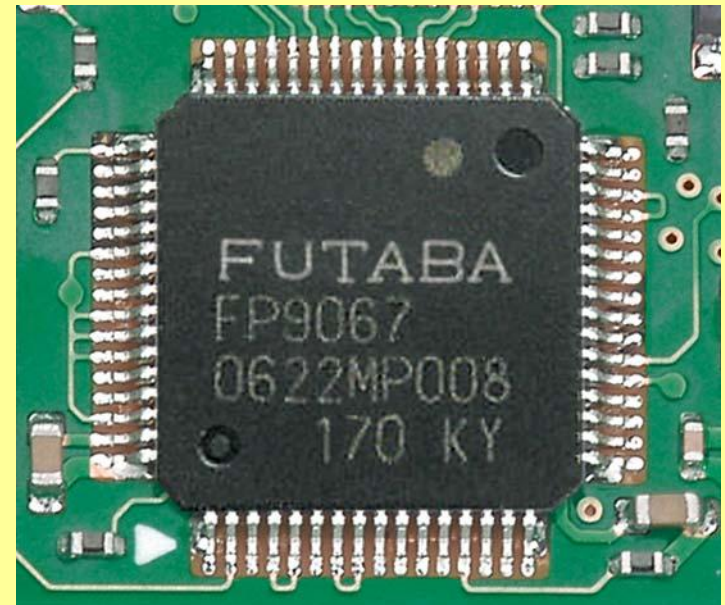
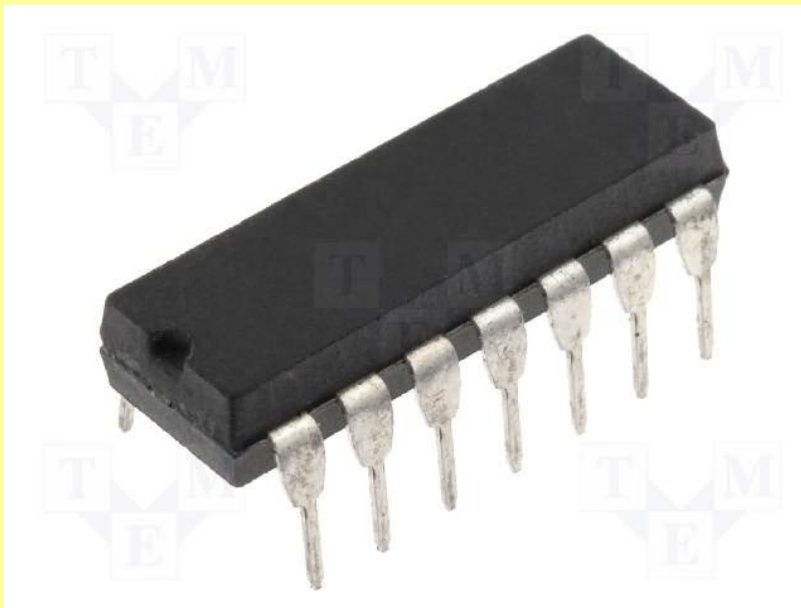
rozmiar

Systemy mikroelektromechaniczne MEMS

1. Ogólna charakterystyka
- 2. Technologia wytwarzania**
3. Przykłady zastosowań

MEMS-y są zwykle wykonywane w krzemie lub szkle przy użyciu technik mikroobróbki, takich jak anizotropowe trawienie.

Technologia ich wytwarzania jest podobna jak technologia wytwarzania układów scalonych (**IC technology**).



Historia

Prekursorem współczesnych układów scalonych była wyprodukowana w 1926 lampa próżniowa **Loewe 3NF** zawierająca wewnątrz jednej bańki:

- ✓ trzy triody (dwie sygnałowe i jedną głośnikową),
- ✓ dwa kondensatory,
- ✓ cztery rezystory.

Całość była przeznaczona do pracy jako jednoobwodowy radioodbiornik reakcyjny.



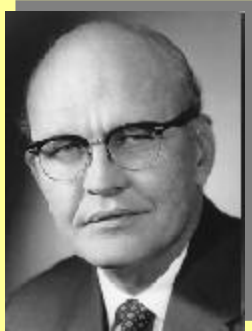
*Pierwszą osobą która opracowała teoretyczne podstawy układu scalonego był angielski naukowiec **Geoffrey Dummer**, nie udało mu się jednak zbudować pracującego układu.*

*W 1958 **Jack Kilby** z Texas Instruments i Robert Noyce z Fairchild Semiconductor niezależnie od siebie zaprojektowali i zbudowali działające modele układów scalonych.*

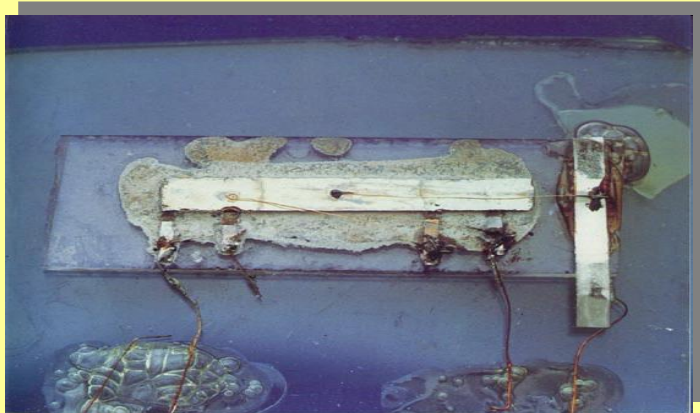
***Kilby** zademonstrował swój wynalazek 12 września 1958 (za co otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki w 2000), **Noyce** zbudował swój pierwszy układ scalony około pół roku później.*

1958: Pierwszy układ scalony

NAGRODA NOBLA - 2000



Jack S. Kilby, Texas Instruments



Pierwszy, germanowy układ scalony. Zawierał pięć elementów: tranzystory, rezystory i kondensatory



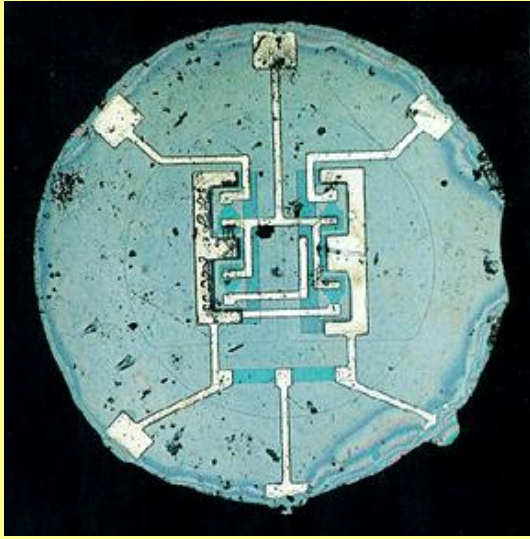
Robert N. Noyce, Fairchild



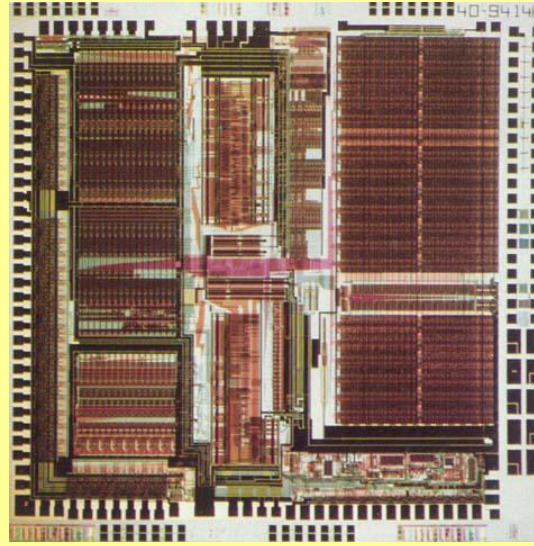
Pierwszy, krzemowy, planarny układ scalony. Zawierał 4 tranzystory i pięć rezystorów

Układ scalony: Wiele tranzystorów połączonych ze sobą w jednym chipie

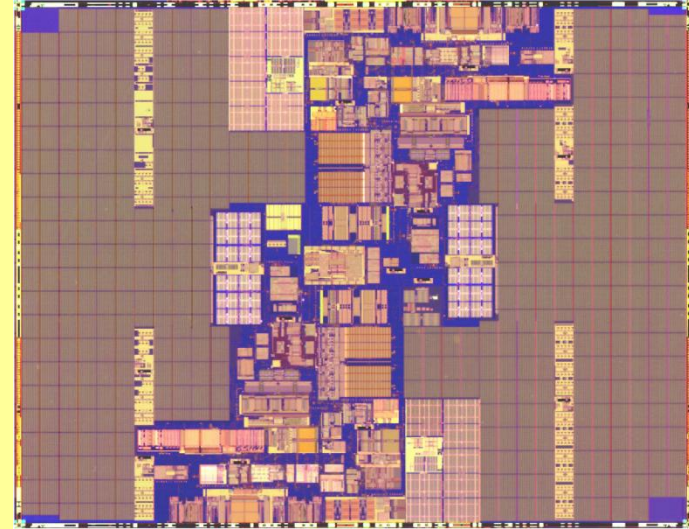
Fairchild



HP



Intel



1961 – 4 Tranzystory

1981 ~ ½ miliona

2004 ~ 1.72 miliarda

“Prawo Moore’a”

Liczba tranzystorów w układach scalonych rośnie wykładniczo

Ze względu na **stopień scalenia** występuje, w zasadzie historyczny, podział na układy:

- ✓ małej skali integracji (**SSI** – *small scale of integration*)
- ✓ średniej skali integracji (**MSI** – *medium scale of integration*)
- ✓ dużej skali integracji (**LSI** – *large scale of integration*)
- ✓ wielkiej skali integracji (**VLSI** – *very large scale of integration*)
- ✓ ultrawielkiej skali integracji (**ULSI** – *ultra large scale of integration*)

Technologia planarna wytwarzania układów scalonych

W procesie produkcji monolitycznego układu scalonego można wyróżnić ok. 350 operacji technologicznych.

Poniżej zostanie przedstawiony tylko zarys czynności koniecznych do wyprodukowania układu.

Czynności koniecznych do wyprodukowania układu

1. Wytworzenie podłoża
2. Proces epitaksji
3. Maskowanie
 - fotolitografia.
 - wycinanie wiązką elektronową
4. Domieszkowanie
5. Wykonanie połączeń
6. Montaż

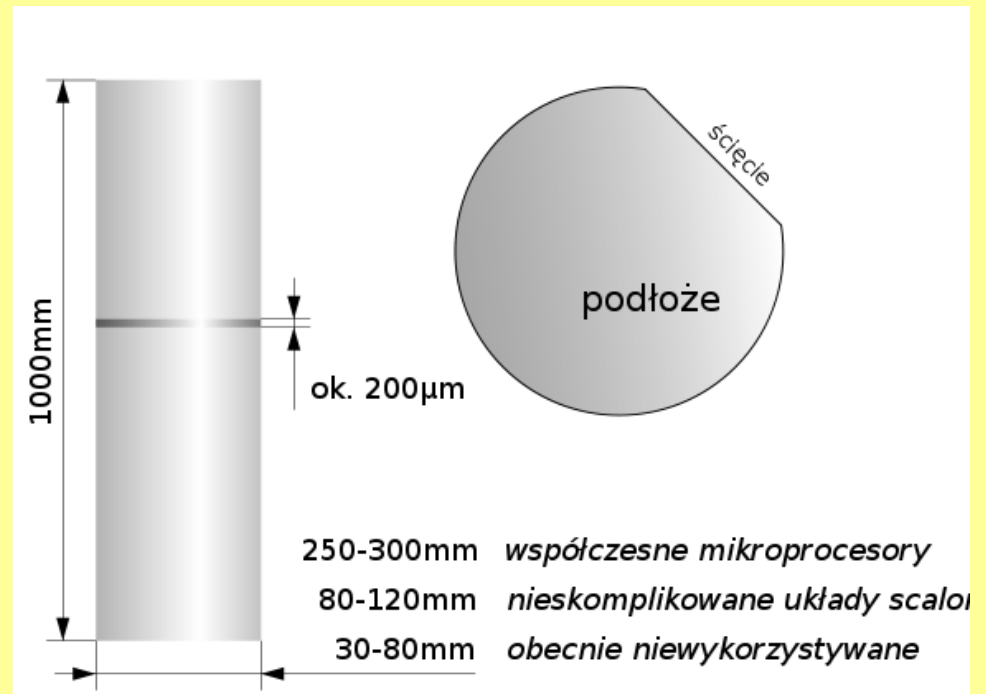
Wyciąganie monokryształów krzemu



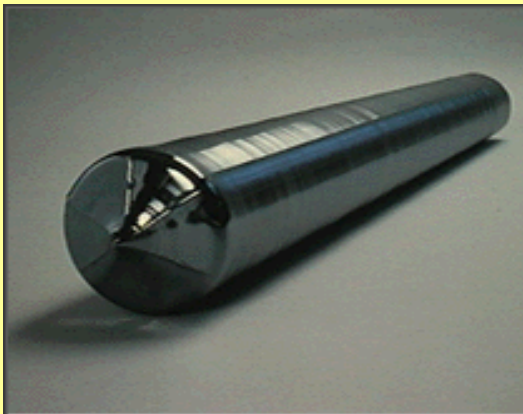
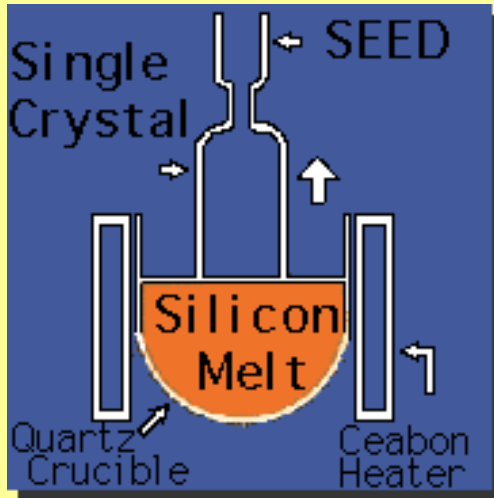
**„Pręt” monokryształu
krzemu o średnicy 300
mm (12 cali) Ciężar ok.
250 kg !!!**

1. Wytworzenie podłoża

- ❑ z pręta (walca) monokrystalicznego półprzewodnika wycinane są piłą diamentową plastry (dyski) o grubości kilkuset mikrometrów
- ❑ krawędź plastra jest ścinana, by możliwe było określenie jego orientacji w dalszych etapach
- ❑ plaster następnie podlega szlifowaniu oraz polerowaniu stając się podłożem dla układów scalonych



Czochralski process



2. Proces epitaksji

- na podłożu wytwarzana jest cienka warstwa epitaksjalna półprzewodnika o przeciwnym typie przewodnictwa niż podłoże. Warstwa ta ma grubość kilka-kilkadziesiąt mikrometrów i charakteryzuje się dużą jednorodnością i gładkością powierzchni.

Epitaksja – technika półprzewodnikowa wzrostu nowych warstw monokryształu na istniejącym podłożu krystalicznym, która powiela układ istniejącej sieci krystalicznej podłoża.

Zjawisko epitaksjalnej krystalizacji lodu na jodkach metali jest używane do rozpraszania mgły i wywoływania opadów.

3. **Maskowanie** – celem tego etapu jest wytworzenie maski, która umożliwi selektywne domieszkowanie warstwy epitaksjalnej
- ❑ warstwa epitaksjalną jest utleniana – na jej powierzchni wytwarza się cienka warstwa dwutlenku krzemu – warstwa maskująca; jej grubość wynosi mikrometr lub mniej, nawet kilka warstw atomów
 - ❑ w warstwie maskującej wykonywane są otwory. Istnieją dwie techniki:
 - ✓ fotolitografia
 - ✓ wycinanie wiązką elektronową

✓ Fotolitografia:

- o na warstwę maskującą nakładana jest emulsja światłoczuła
- o nakładana jest maska fotograficzna
- o następuje naświetlenie światłem ultrafioletowym (wysoka częstotliwość ultrafioletu pozwala uzyskać wysoką rozdzielczość)
- o emulsja w miejscach naświetlonych podlega polimeryzacji
- o emulsja niespolimeryzowana zostaje wypłukana
- o dwutlenek krzemu w miejscach odsłoniętych jest wytrawiany, odsłaniając fragmenty warstwy epitaksjalnej
- o na końcu pozostała emulsja jest usuwana (chemicznie albo mechanicznie)

✓ Wycinanie wiązką elektronową:

- ✓ precyzyjnie sterowana wiązka elektronów wycina w dwutlenku krzemu otwory. Jest to technika bardziej precyzyjna, ale droższa niż fotolitografia.

4. Domieszkowanie

Odsłonięte części warstwy epitaksjalnej są domieszkowane. Robi się to dwiema metodami:

- o **dyfuzja domieszek** – w wysokiej temperaturze (ok. 1200 °C) domieszki niesione przez gaz szlachetny dyfundują w odsłonięte miejsca półprzewodnika; można bardzo precyzyjnie określić koncentrację nośników i głębokość domieszkowania.
- o **implantacja jonów** – zjonizowane domieszki są przyspieszane i "wbijane" w półprzewodnik.

Domieszkowanie - wprowadzanie obcych jonów/atomów do sieci krystalicznej metalu, półprzewodnika lub materiału ceramicznego tworzących roztwory stałe.

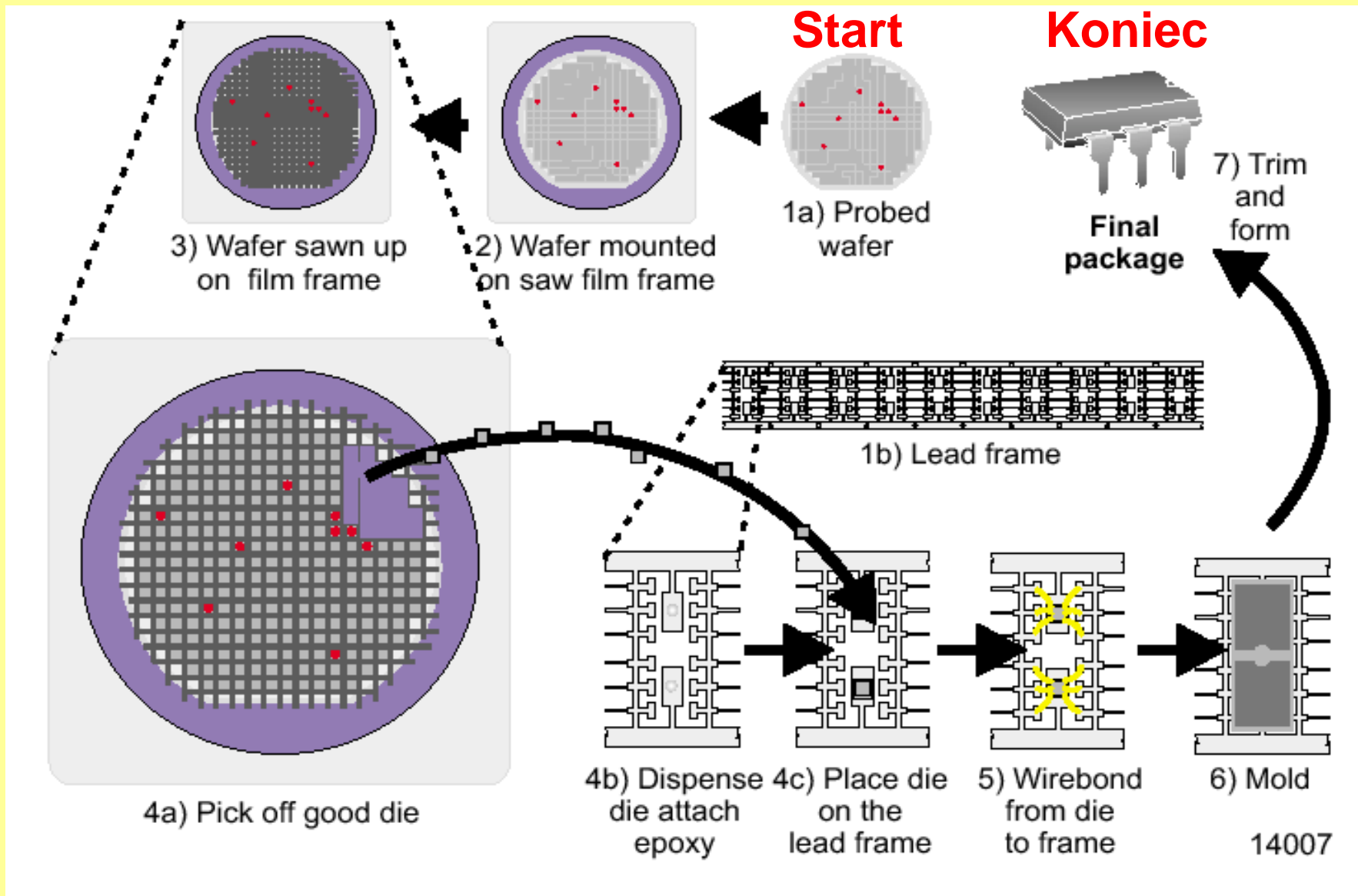
5. Wykonanie połączeń

- ❑ całość jest ponownie maskowana dwutlenkiem krzemu
- ❑ w tlenku wykonywane są niezbędne otwory połączeniowe.
- ❑ napyłane są warstwy przewodzące - jako przewodnik stosuje się aluminium lub miedź

6. Montaż

- ❑ cięcie podłoża na indywidualne układy piłą diamentową lub laserem
- ❑ indywidualne układy są testowane testerem ostrzowym
- ❑ wykonywane są połączenia struktury z wyprowadzeniami zewnętrznymi za pomocą cienkich drucików aluminiowych lub złotych

Układy scalone



Technologia wytwarzania MEMS

Mimo, że termin **MEMS** nie jest ograniczony do mikroobróbki krzemu, to większość obecnych technologii **MEMS** bazuje na krzemie.

Wynika to z kilku ważnych przyczyn.

Płytki monokrystalicznego krzemu oferuje doskonałą kombinację jakości:

- od idealnej elastyczności (brak efektu pełzania czy histerezy) do dobrego przewodnictwa cieplnego,
- od niskiej do średniej przewodności elektrycznej (zależnie od rodzaju i poziomu domieszkowania),
- od małego współczynnika rozszerzalności cieplnej do stabilności aż do wysokich temperatur.

Co ważniejsze, **płytki krzemu** są produkowane i wykorzystywane na ogromną skalę w scalonej mikroelektronice, co daje niską cenę i kompatybilne urządzenia.

Dodatkowo - z pewnymi ograniczeniami technologicznymi – **płytki krzemowe** umożliwiają integrację monolityczną funkcji mechanicznych i elektrycznych w tym samym chipie oferując ogromny potencjał, zarówno dla tanich jak i zaawansowanych systemów sensorowych.

Dlatego większość przyrządów **MEMS** jest wykonywana na **płytkach krzemowych** jako podłożu startowym.

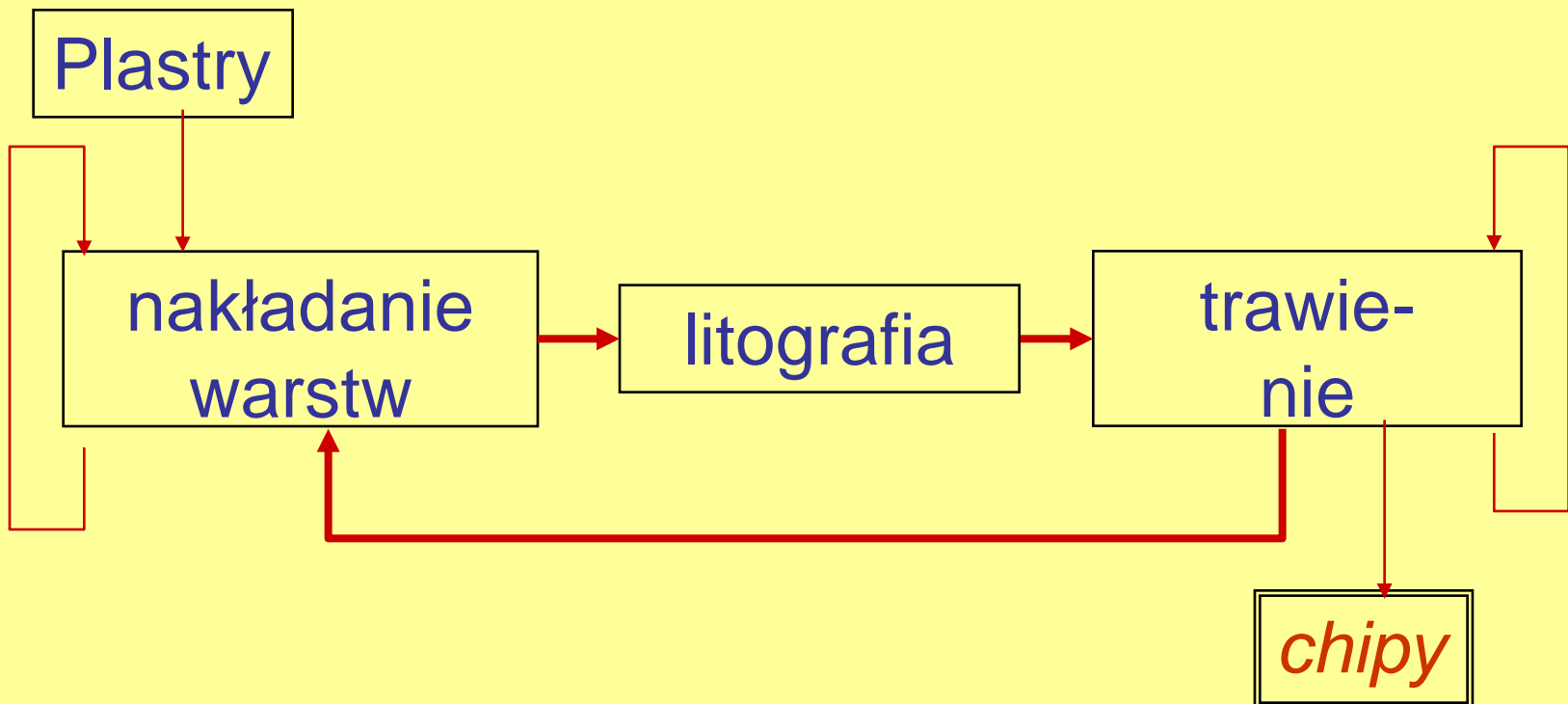
Typowe materiały do wytwarzania MEMS

- Krzem (Si)
 - Domieszkowany Si
 - Poli Si (Polisilikon)
 - Tlenek krzemu
 - Azotek krzemu
- Szkło, Kwarc
- Metale
 - Au, Ag, Al, Ti, Pt
- Polimery
 - Fotorezystywne
 - Poliamidy
 - PDMS (*oleista ciecz o lepkości zależnej od stopnia polimeryzacji, dodatek do kosmetyków*)
- Ceramika
 - PZT (*cyrkonian - tytanian ołowiu*)

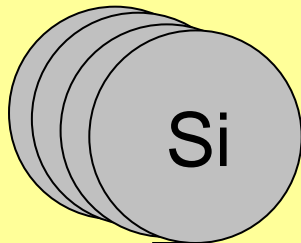
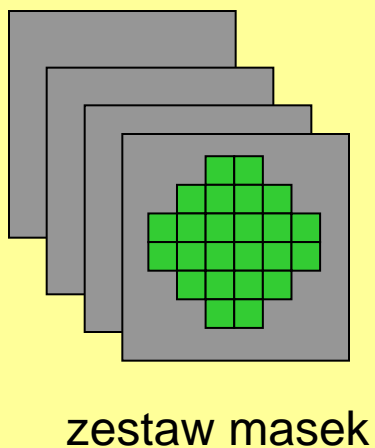
Struktura procesu wytwarzania układów scalonych i MEMS

Procesy wytwarzania układów scalonych i MEMS są prawie takie same

Złożoność procesu zależy od liczby iteracji podstawowej pętli



Powtarzanie sekwencji 4 procesów fizyko-chemicznych: nakładanie warstw, fotolitografia, trawienie i domieszkowanie.

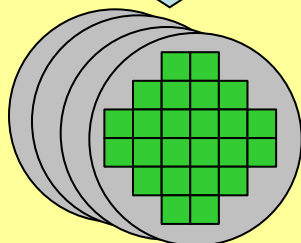


nakładanie warstwy

fotolitografia

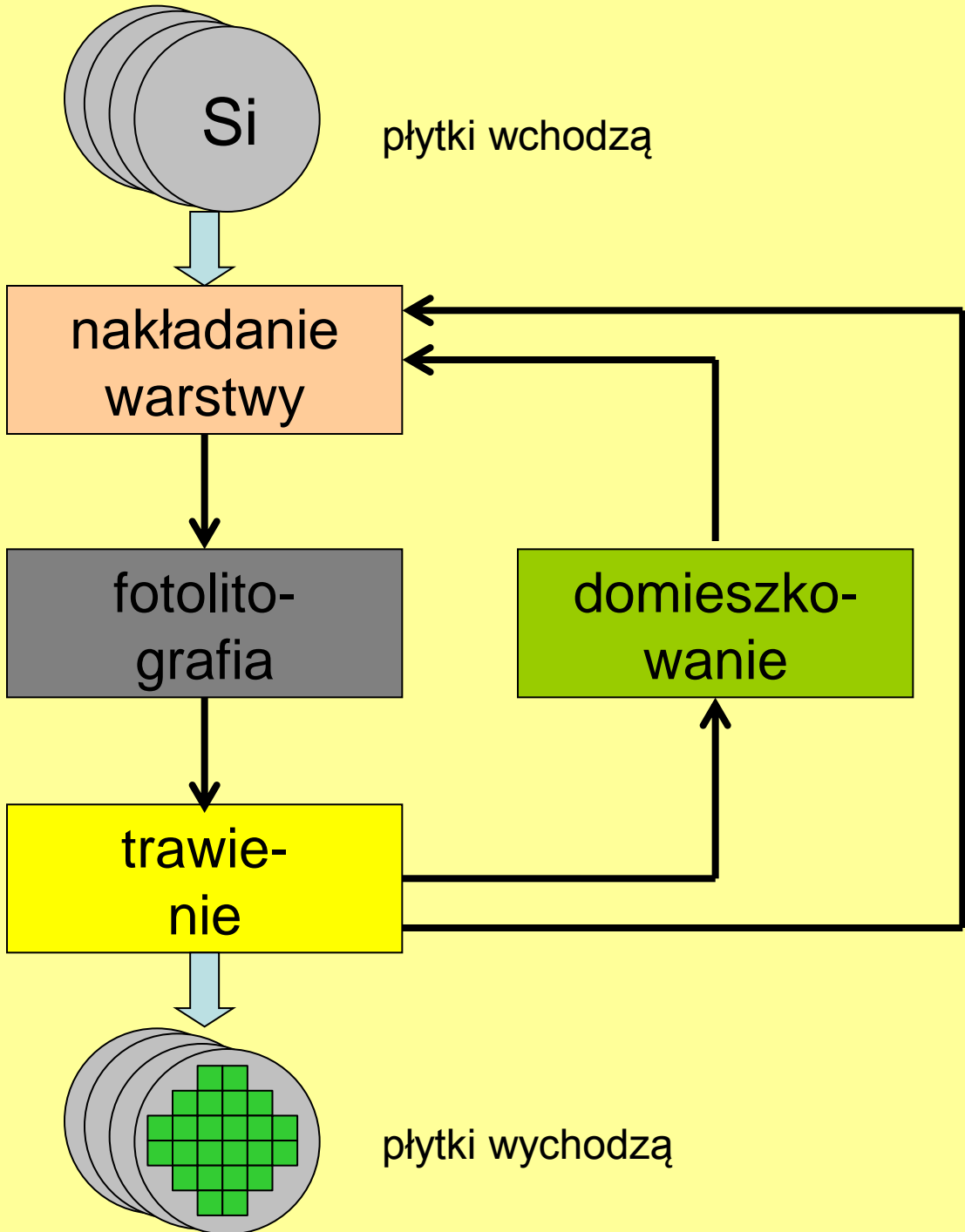
trawienie

domieszkowanie

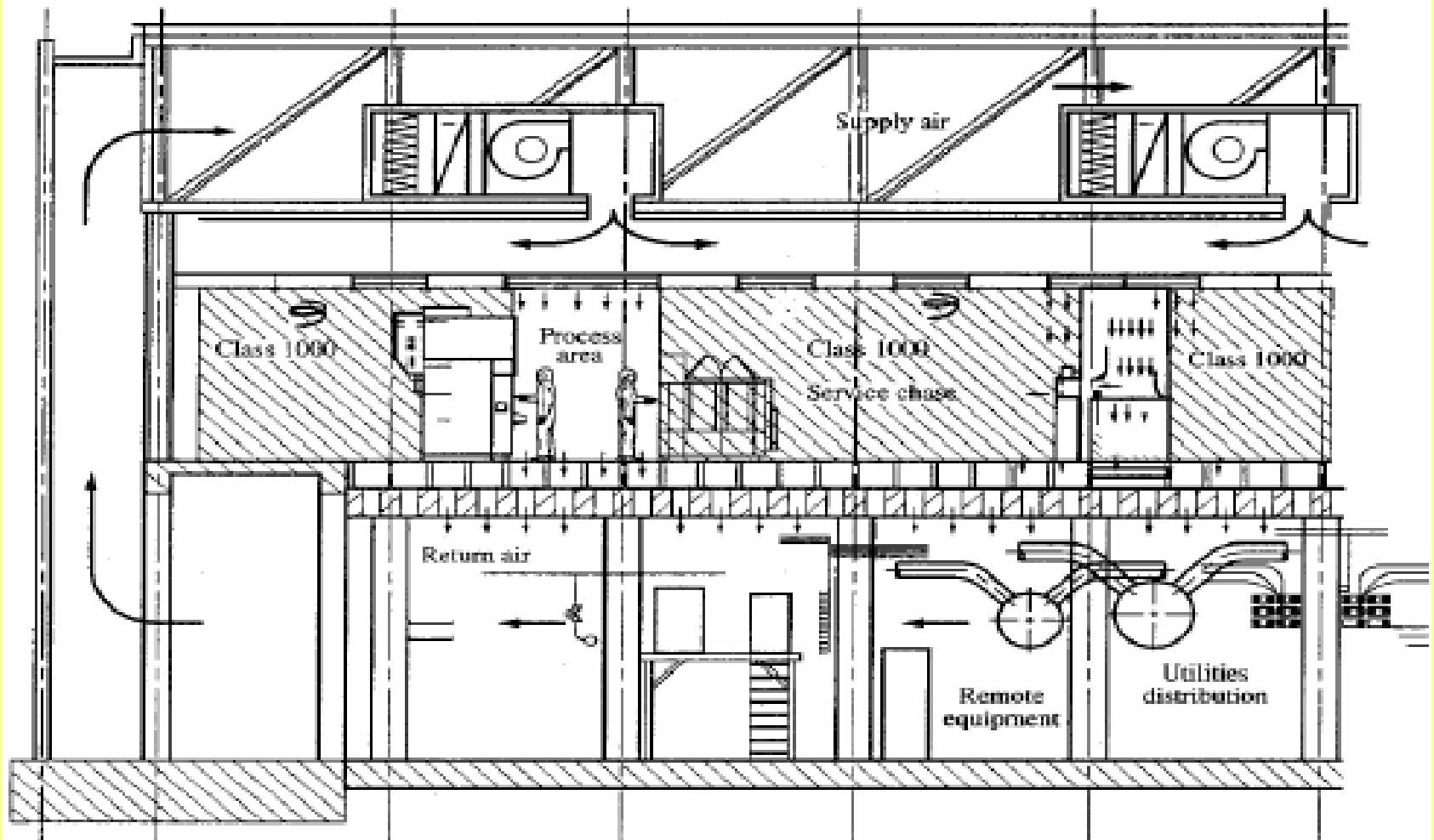


płytki wchodzą

płytki wychodzą



Pracownie sterylne

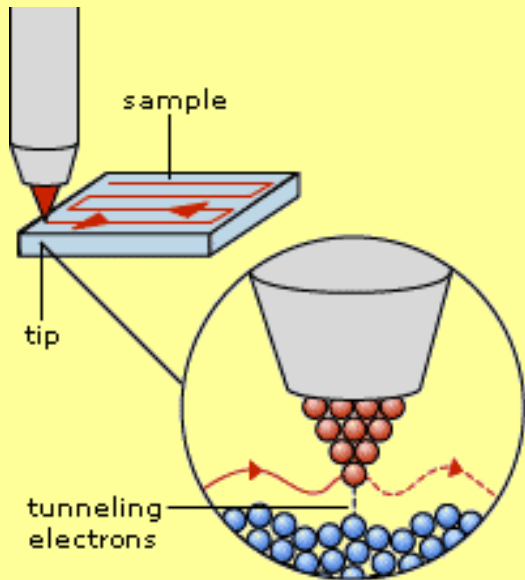


Klasy pracowni sterylnych

class	maximum number of particles per cubic foot of air of diameter greater than or equal to each indicated size					typical uses
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	5.0 μm	
1	35	7.5	3	1	—	integrated circuits
10	350	75	30	10	—	
100	—	7502	300	100	—	miniature ball bearings; photo labs; medical implants
1000	—	—	—	1000	7	
10000	—	—	—	10000	70	color TV tubes; hospital operating room
100000	—	—	—	100000	700	ball bearings

Scanningowy mikroskop tunelowy

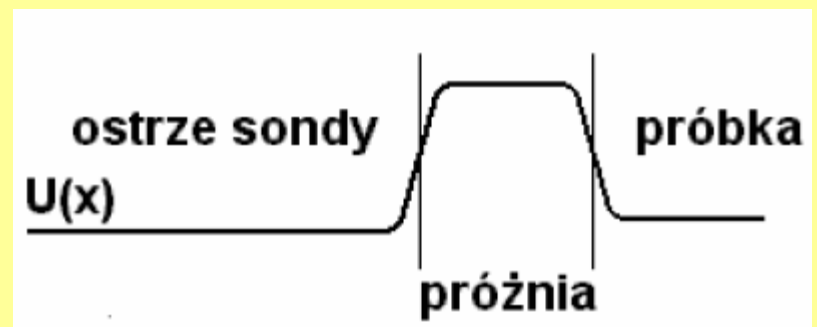
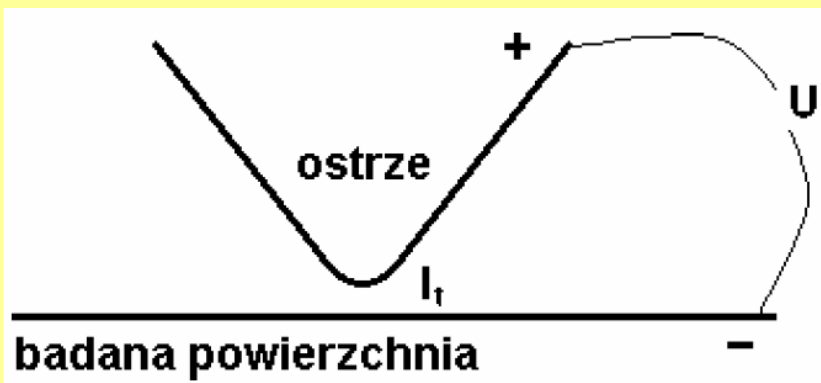
Zasada działania:



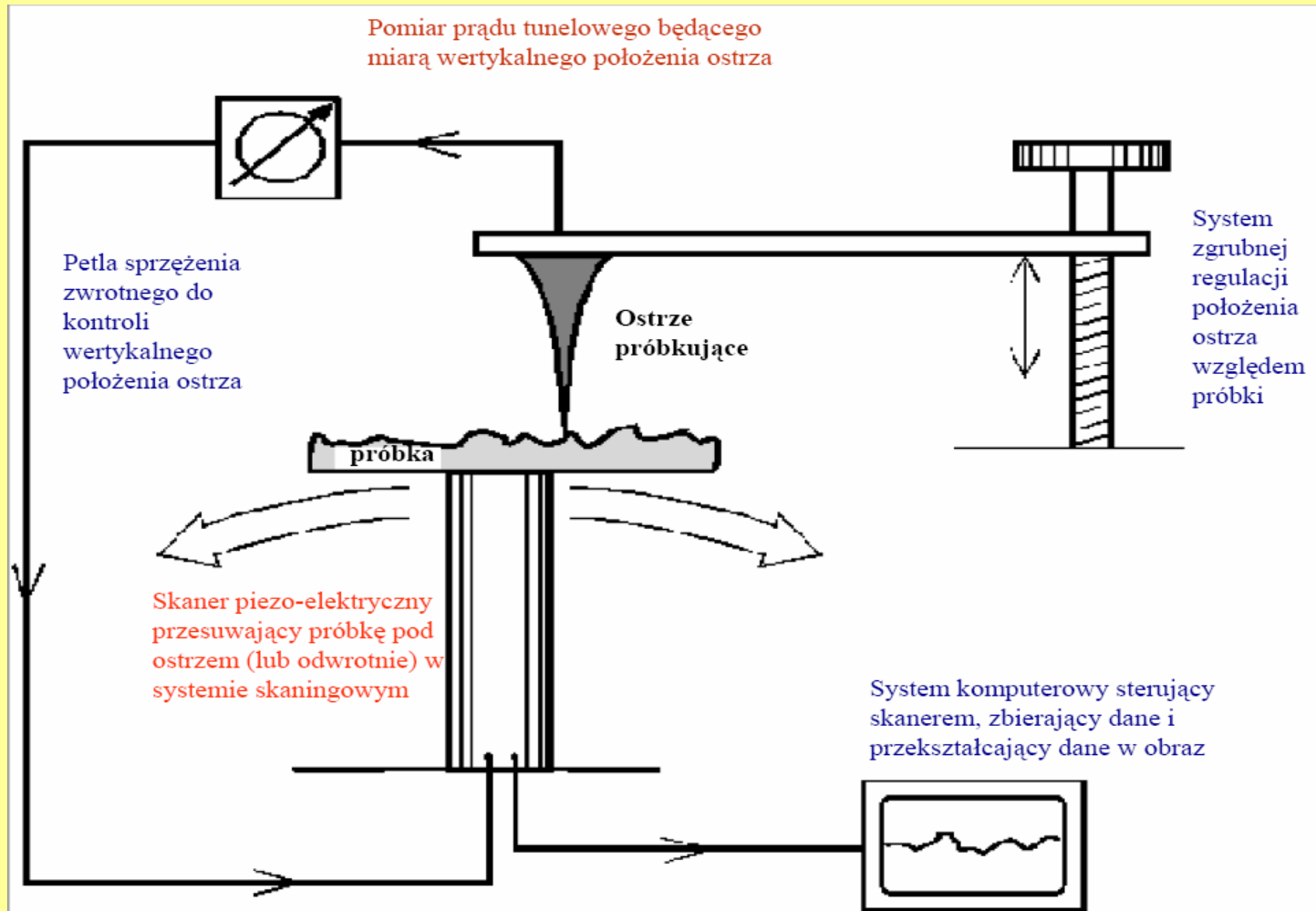
Heinrich Rohrer i Gerd Binnig
The Nobel Prize in Physics, 1986



Bariera potencjału dla elektronów

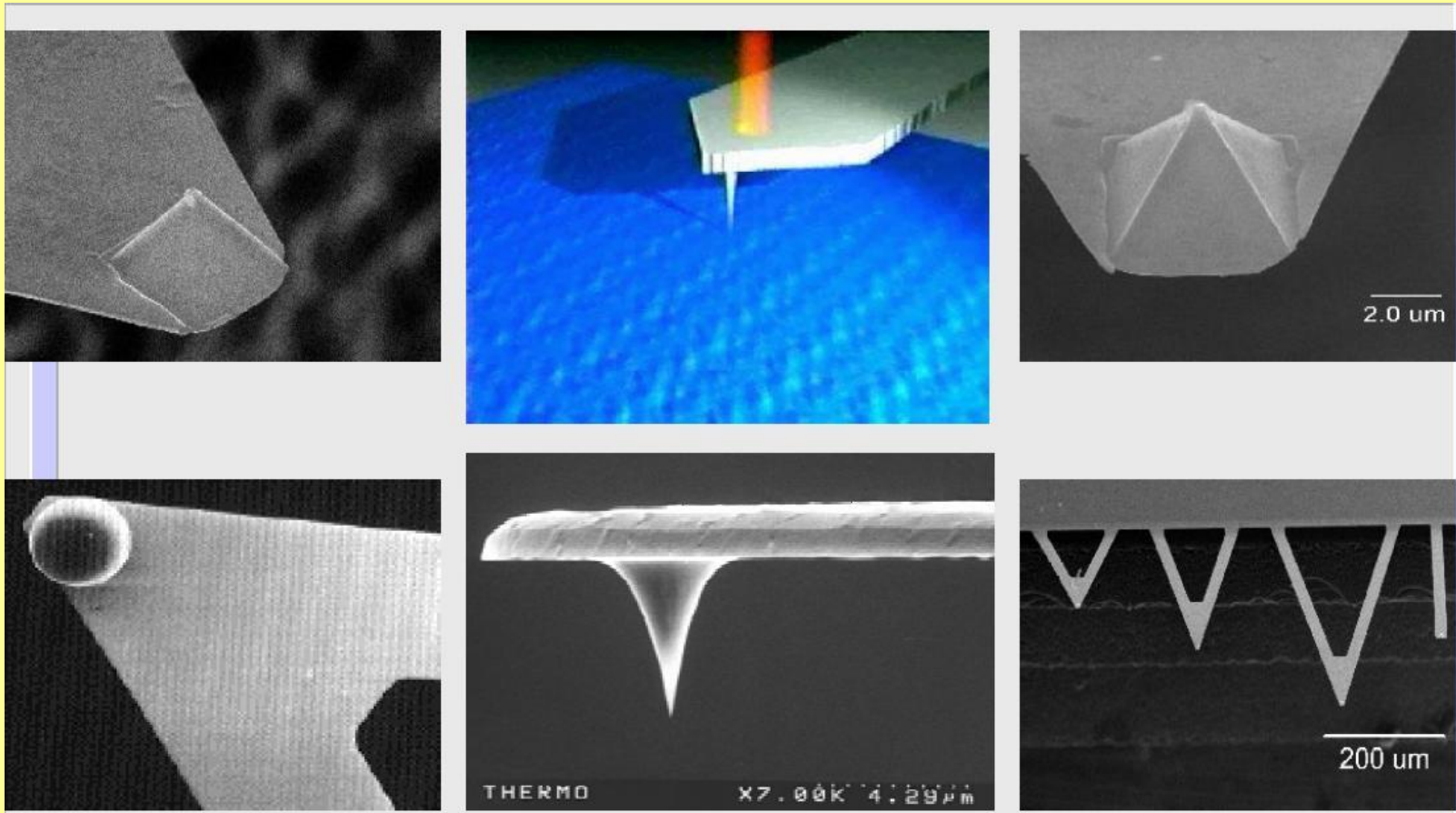


Scanningowy mikroskop tunelowy

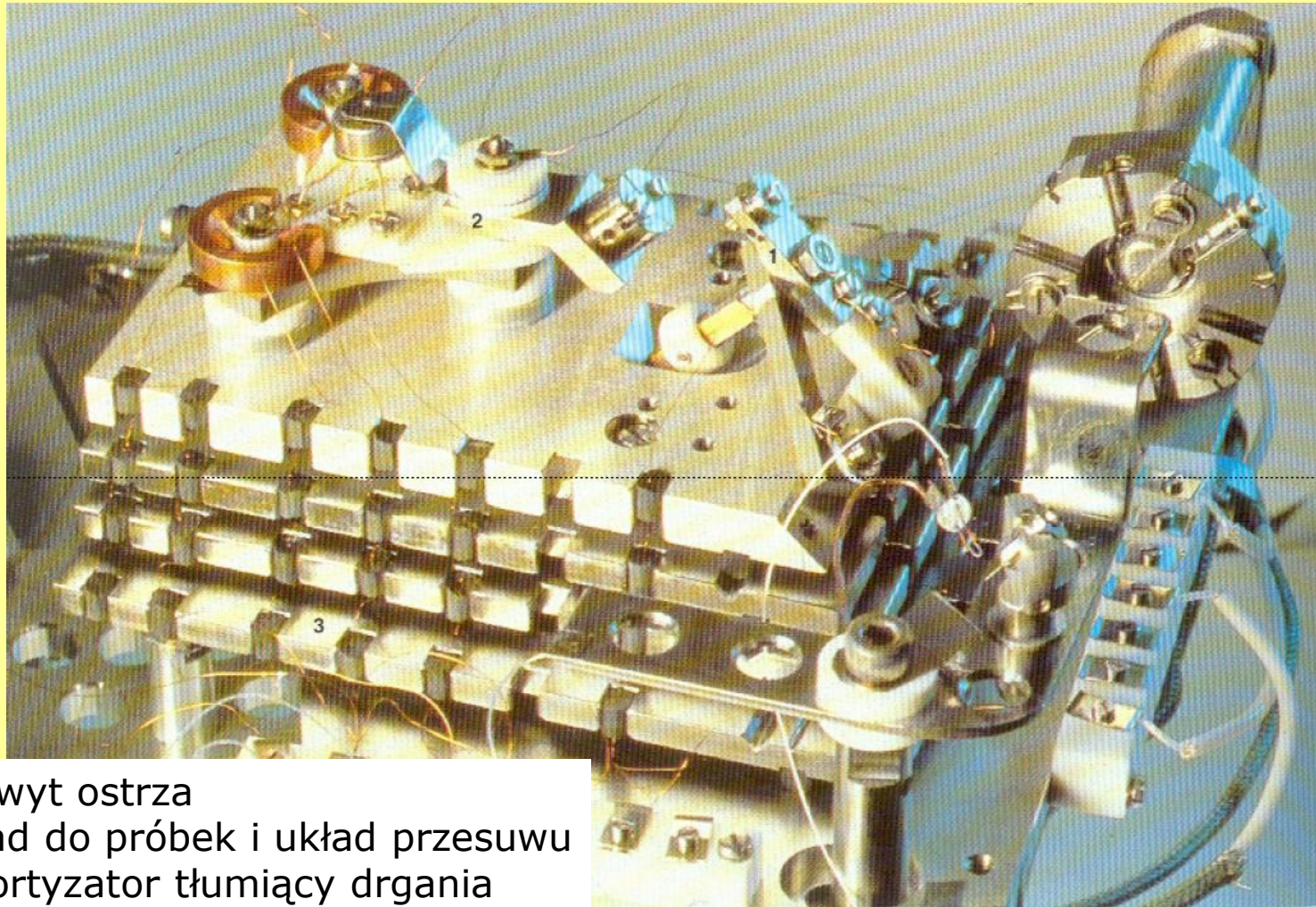


Scanningowy mikroskop tunelowy

Sercem przyrządu jest igła



Scanningowy mikroskop tunelowy

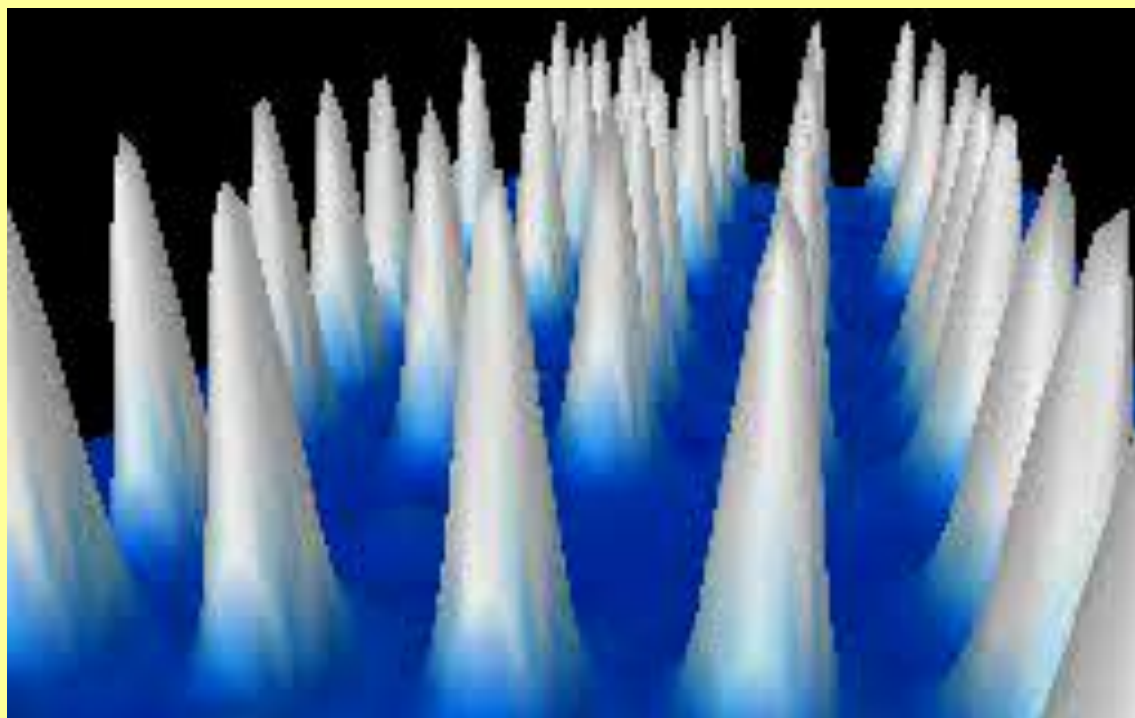


- 1 – uchwyt ostrza
- 2 – układ do próbek i układ przesuwu
- 3 – amortyzator tłumiący drgania

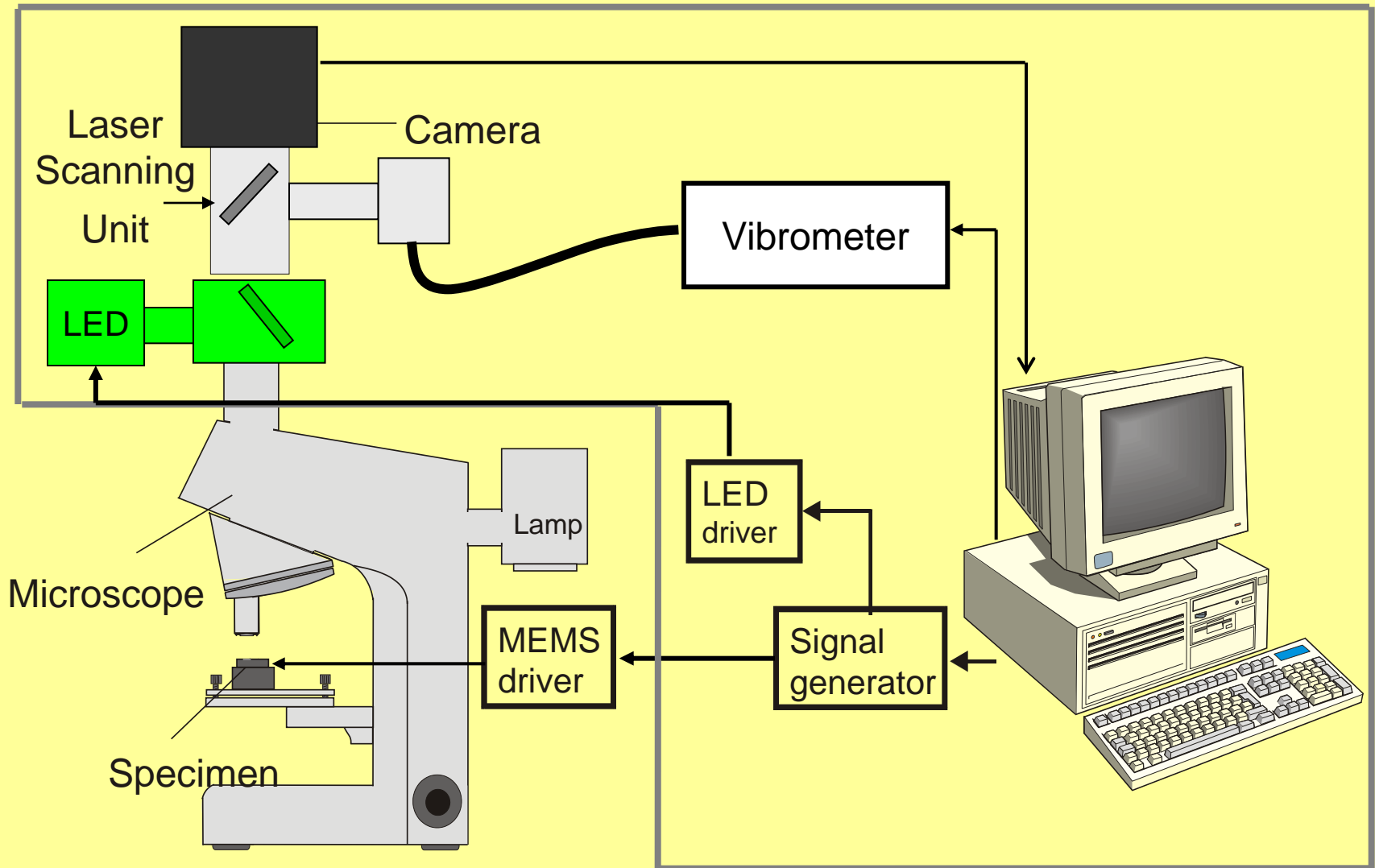
Fizyka współczesna

Scanningowy mikroskop tunelowy

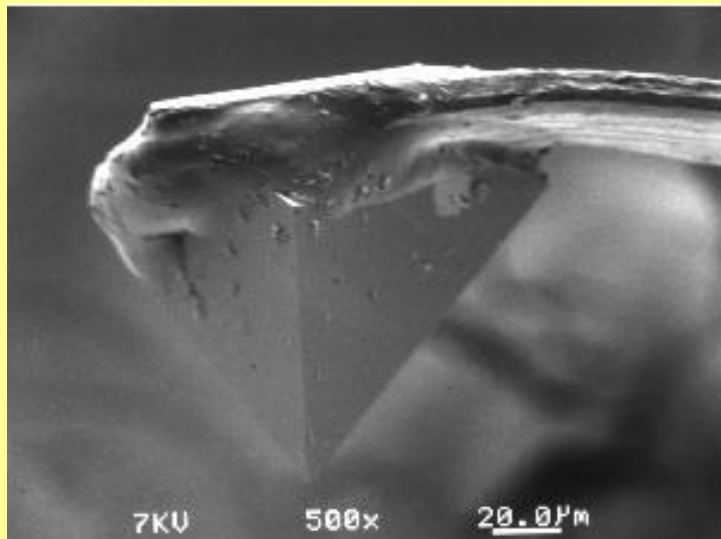
Efektem 18-godzinnego doświadczenia był znak firmowy laboratorium, w którym eksperyment został wykonany. Napis IBM składał się z 35 atomów. Rozmiar liter wynosił 5 nm!



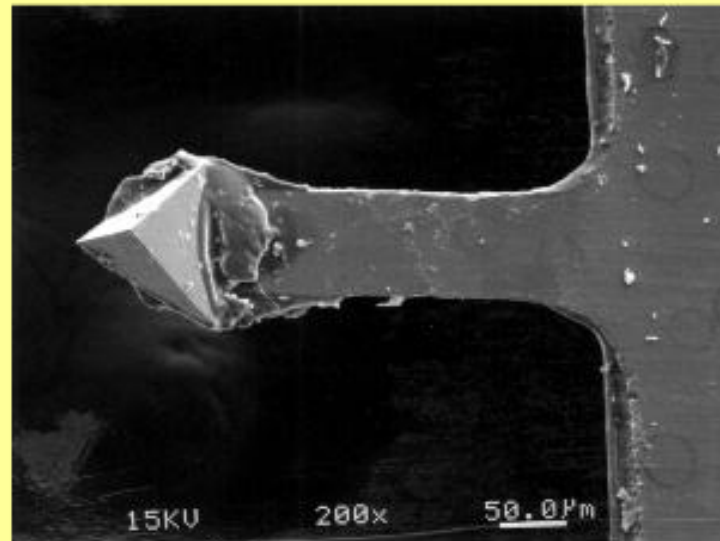
Analiza 3-D



Mikroskop atomowy - obraz



(a)



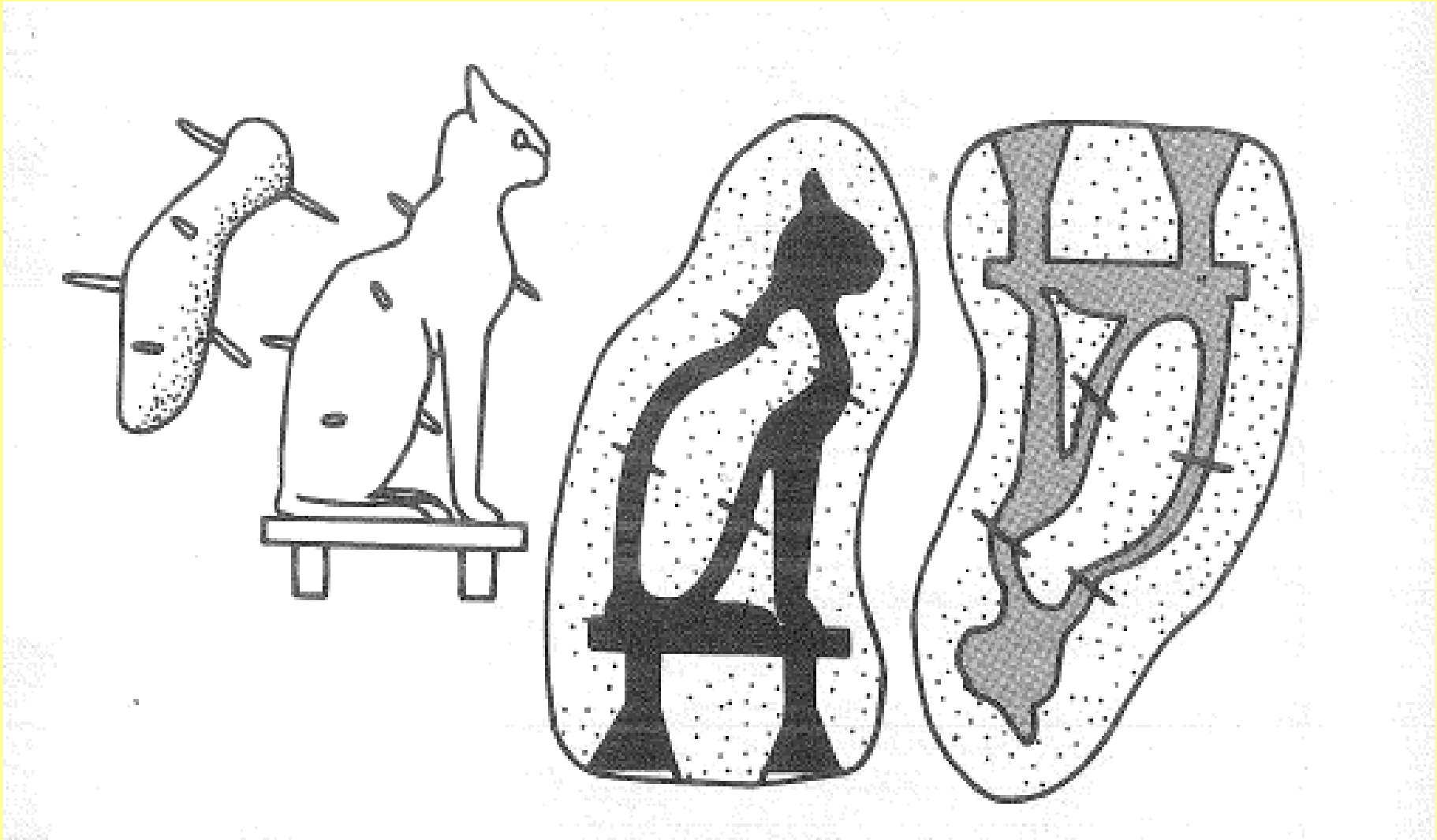
(b)

wspornik z diamentową końcówką

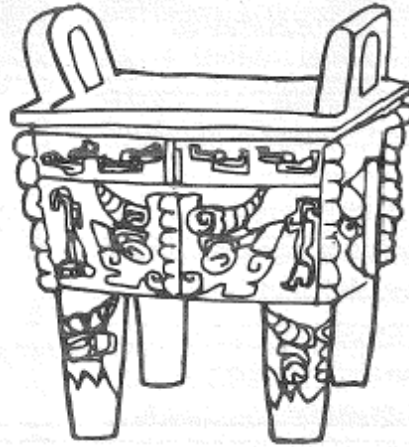
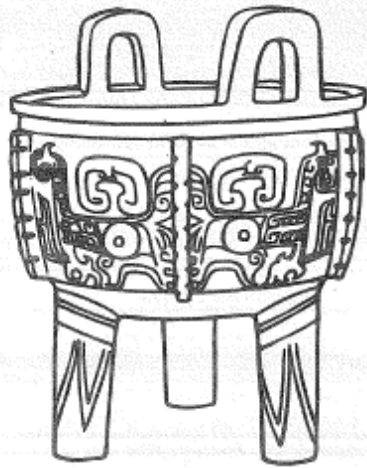
Podstawowe techniki wytwarzania MEMS

- mikroobróbka powierzchniowa (*Surface Micromachining*) - czujniki ciśnienia; akcelerometry; projektory cyfrowe
- mikroobróbka objętościowa (*Bulk Micromachining*) - czujniki ciśnienia; akcelerometry; dysze drukujące
- LIGA (*High Aspect Ratio Micromachining*) - mechanizmy
- inne

warstwa tracona (ofiarna)



Technika wosku traconego *cire perdue*



Chińczycy dość wcześnie opanowali do perfekcji system odlewania w formach wieloczęściowych, stało się to za czasów dynastii Szang ok. roku 1500 p.n.e. Najpiękniejsze i najdoskonalsze dzieła z brązu wykonywali używając techniki odlewania na wosk tracony.

Mikroobróbka powierzchniowa (*Surface Micromachining*)

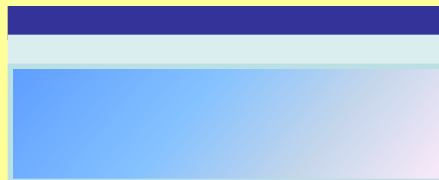
*Jak zbudowano
most ?*



1. Zbudowano warstwę traconą (ofiarną) (drewniane belki - szalunek).
2. Na warstwę traconą nałożono warstwę kamieni tzw. warstwę strukturalną.
3. Usunięto warstwę traconą.

tworzenie struktury

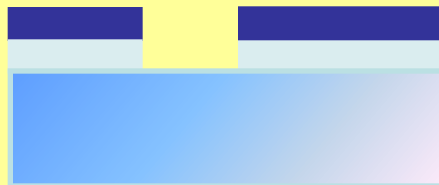
■ -warstwa strukturalna
■ - warstwa tracona



Nakładanie warstw



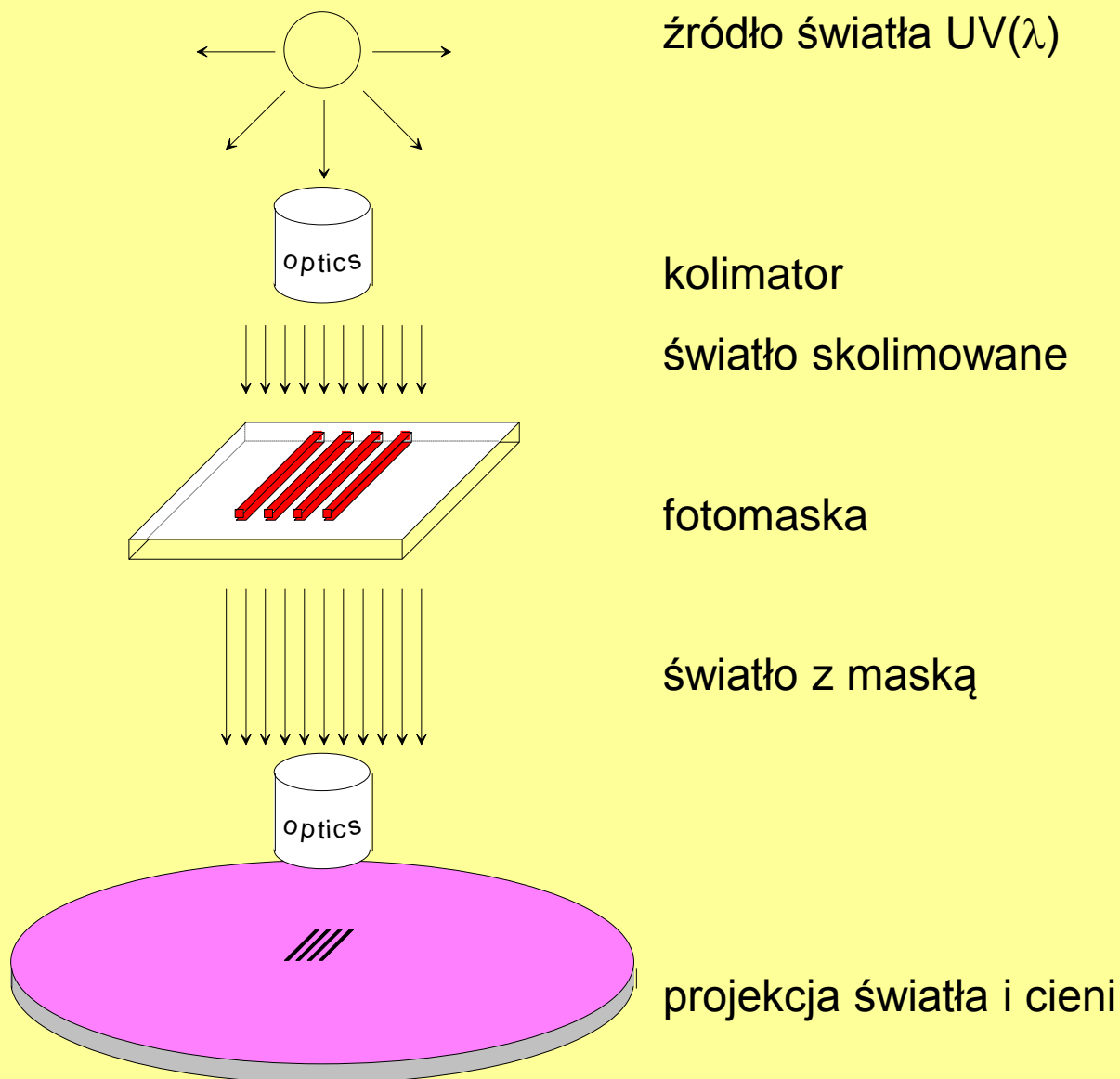
maskowanie



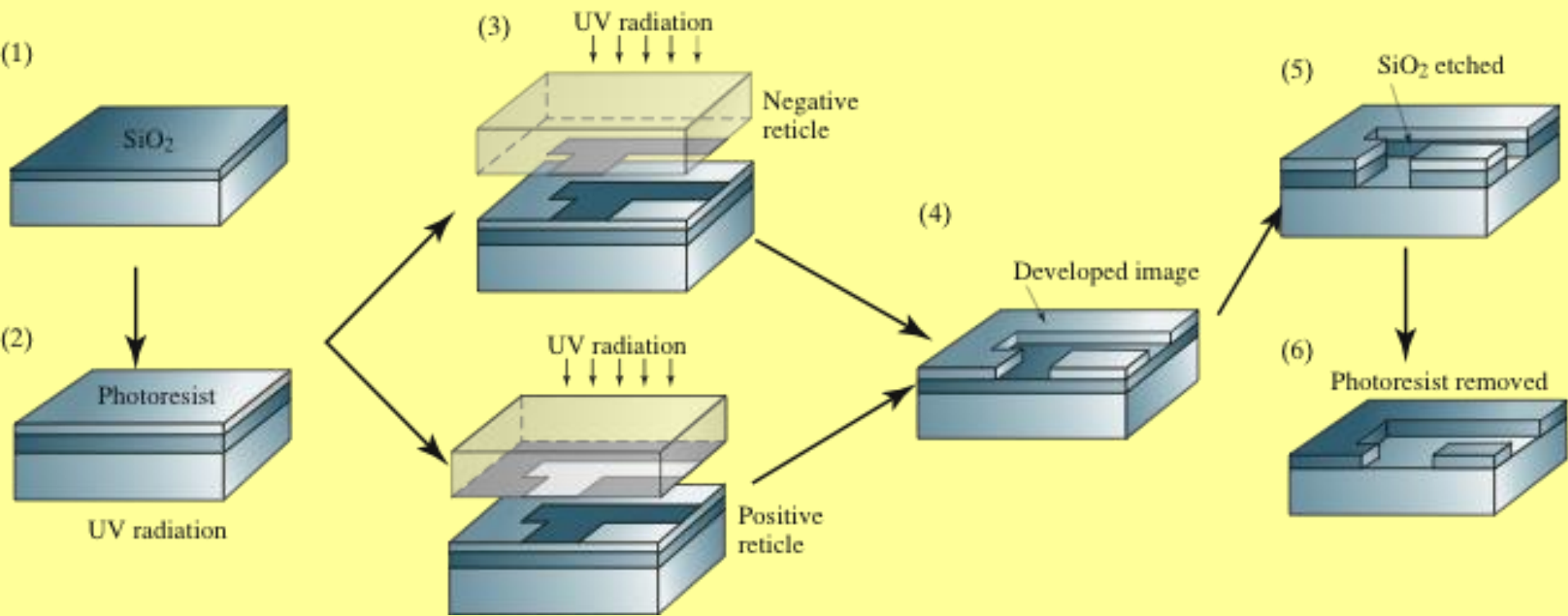
usuwanie

- Nakładanie warstw
 - *utlenianie, nakładanie poprzez chemiczne wyparowywanie, implementacja jonów*
- Maskowanie
 - *fotolitografia*
- Usuwanie
 - *trawienie, wyparowywanie*

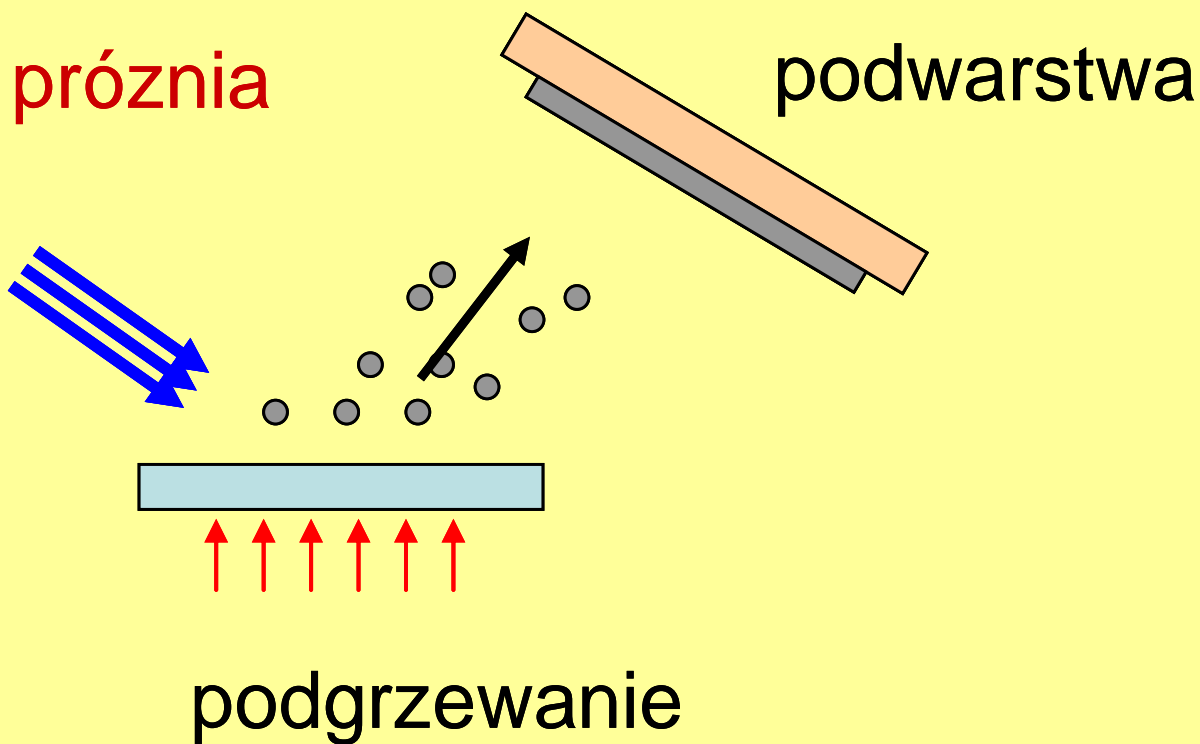
schematyczne przedstawienie procesu fotolitografii



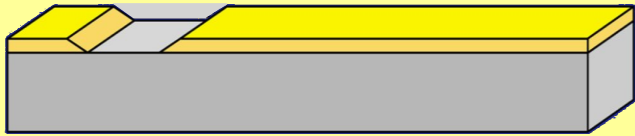
proces fotolitografii



wyparowywanie



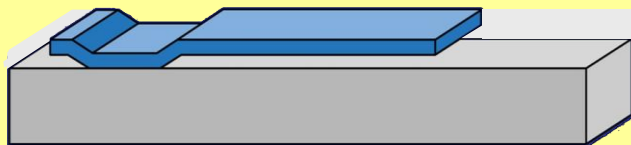
samochodowy czujnik MEMS



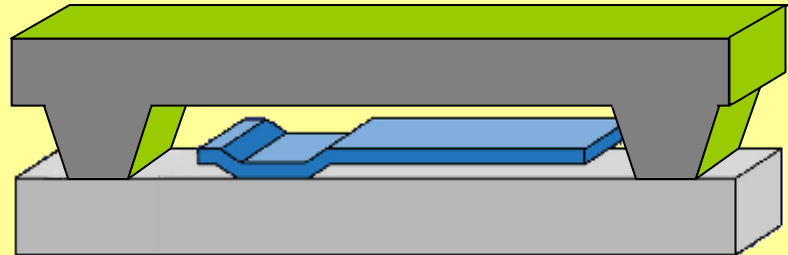
Nakładanie i strukturalizacja warstwy traconej



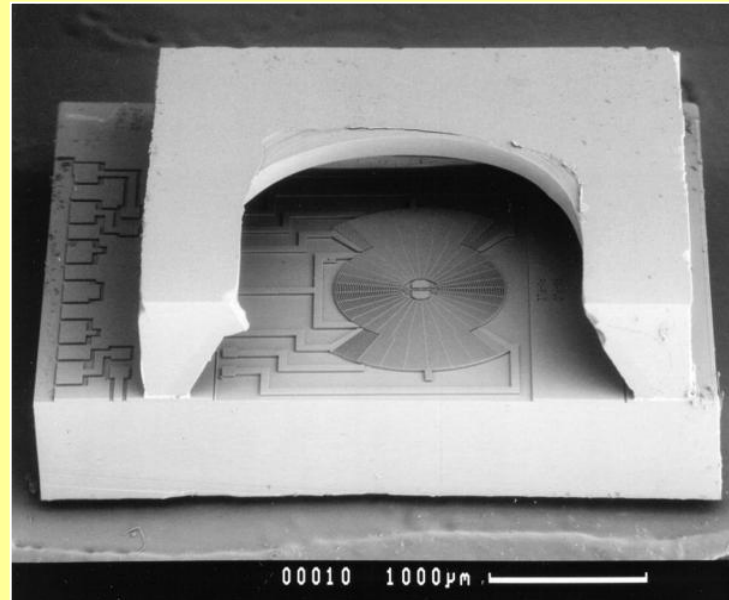
Nakładanie i strukturalizacja polisilikonu

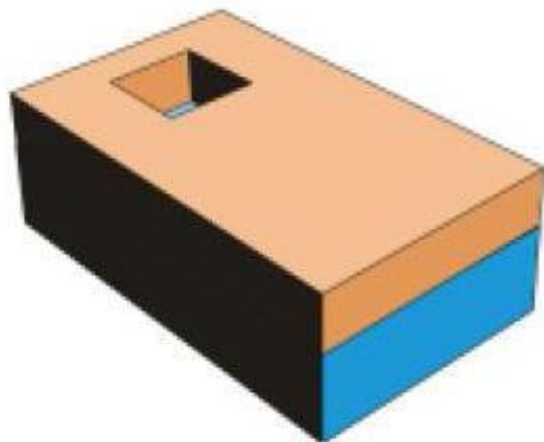


Usuwanie warstwy traconej

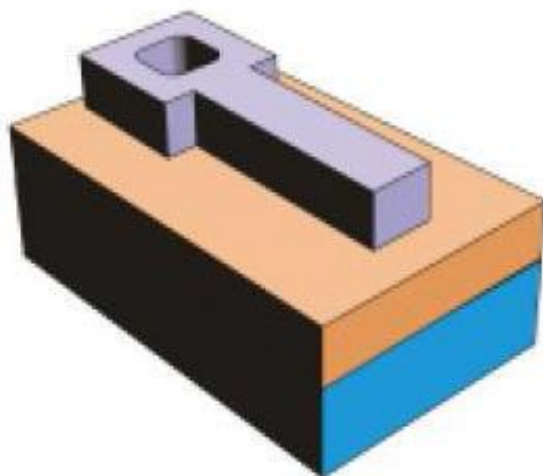


Pozycjonowanie pokrywy krzemowej zabezpieczającej mikrostrukturę

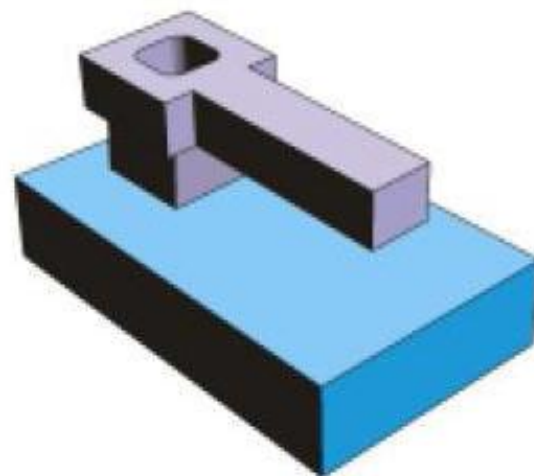




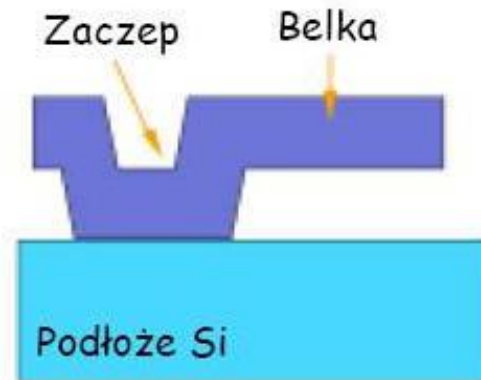
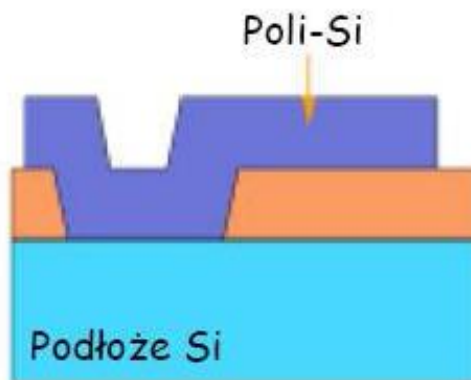
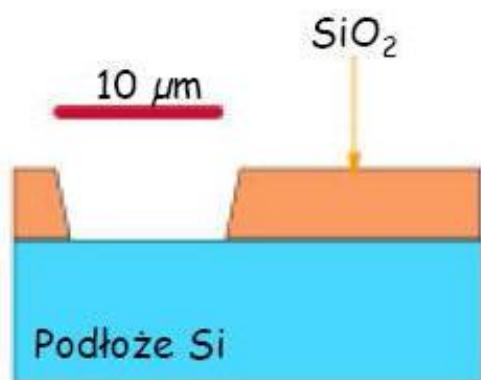
Nałożenie i ukształtowanie
tlenku (warstwy ofiarnej)



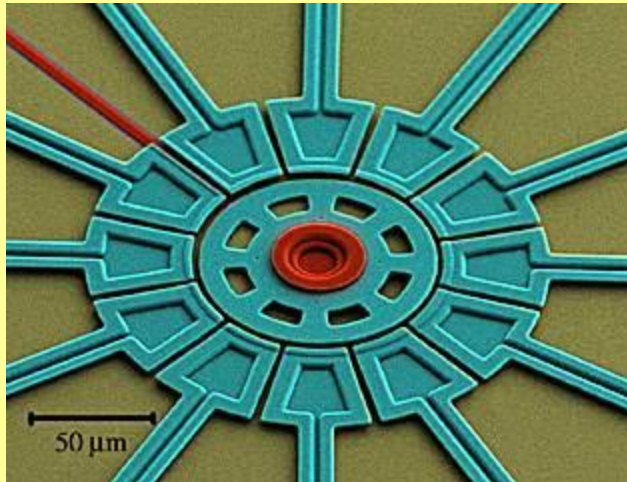
Nałożenie i ukształtowanie
polikrzemu (warstwy strukturalnej)



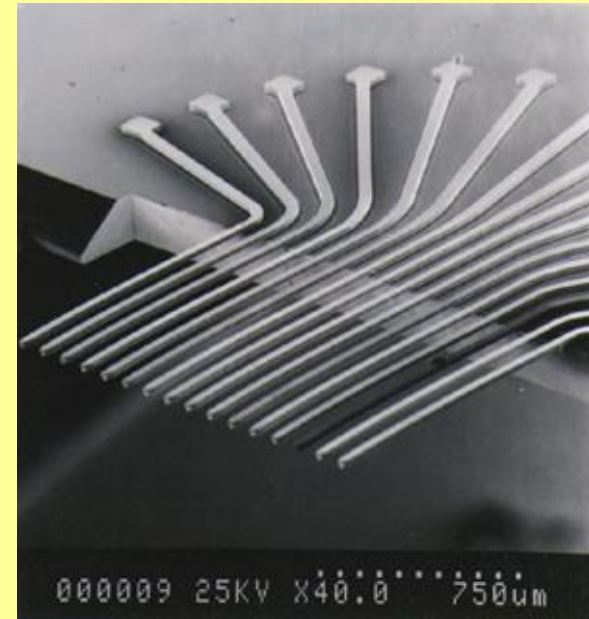
Selektywne trawienie usuwające
warstwę ofiarną
(uwalniające warstwę strukturalną)



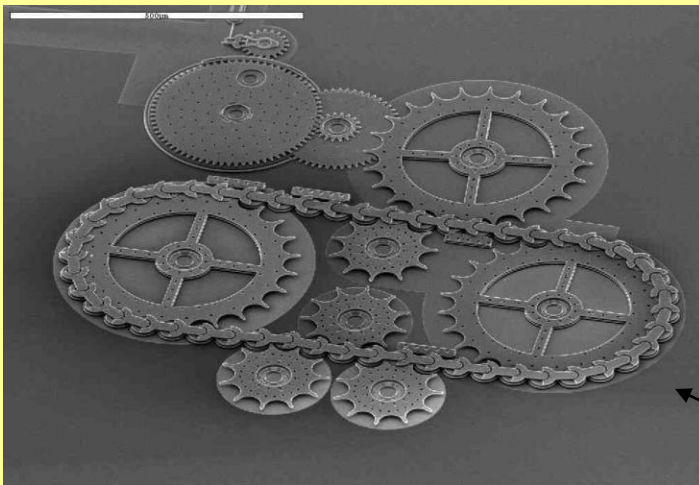
typowe urządzenia MEMS wytworzone mikroobróbką powierzchniową



mikrosilnik elektrostatyczny

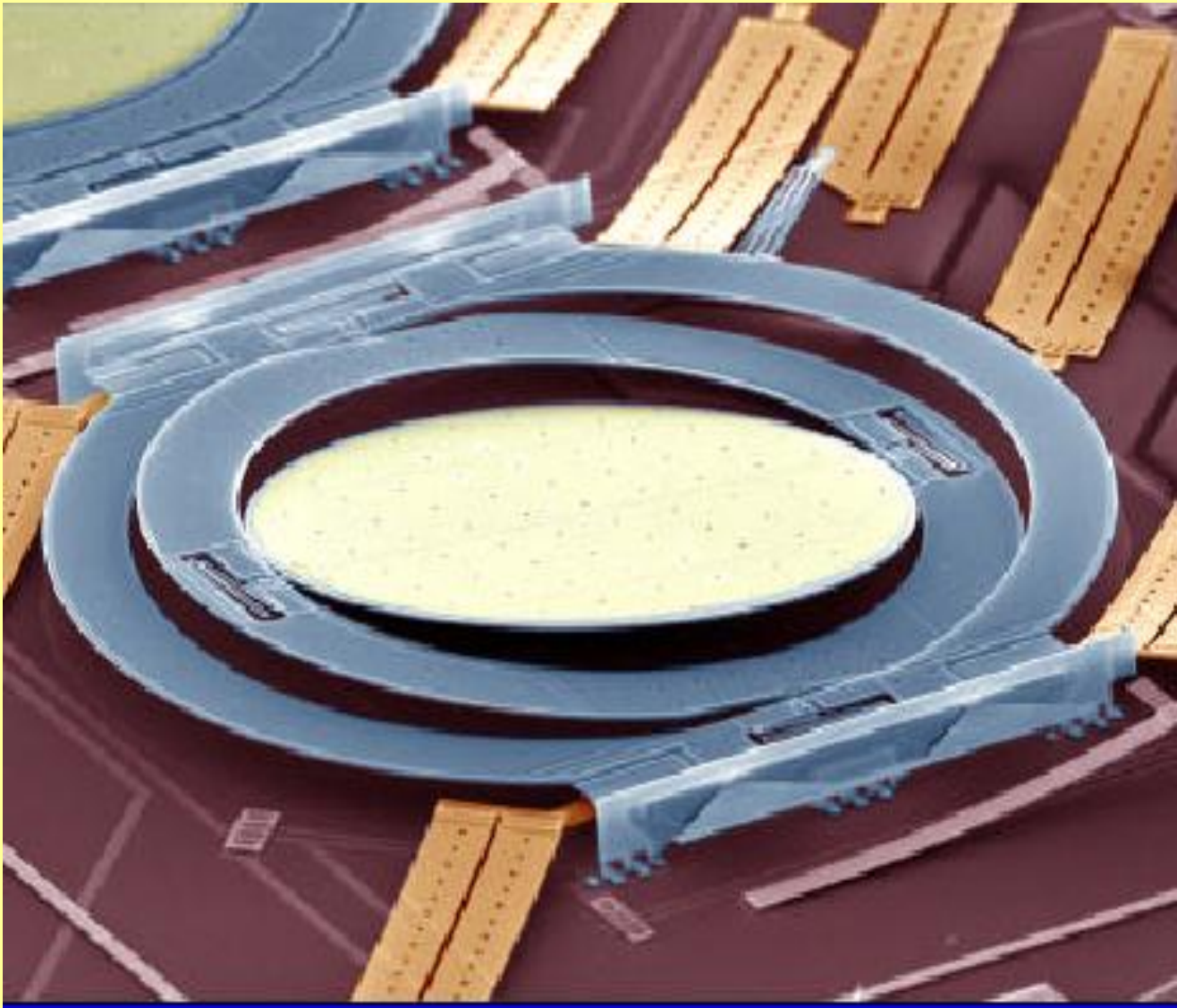


mikrowsporniki



mikroprzekładnia łańcuchowa

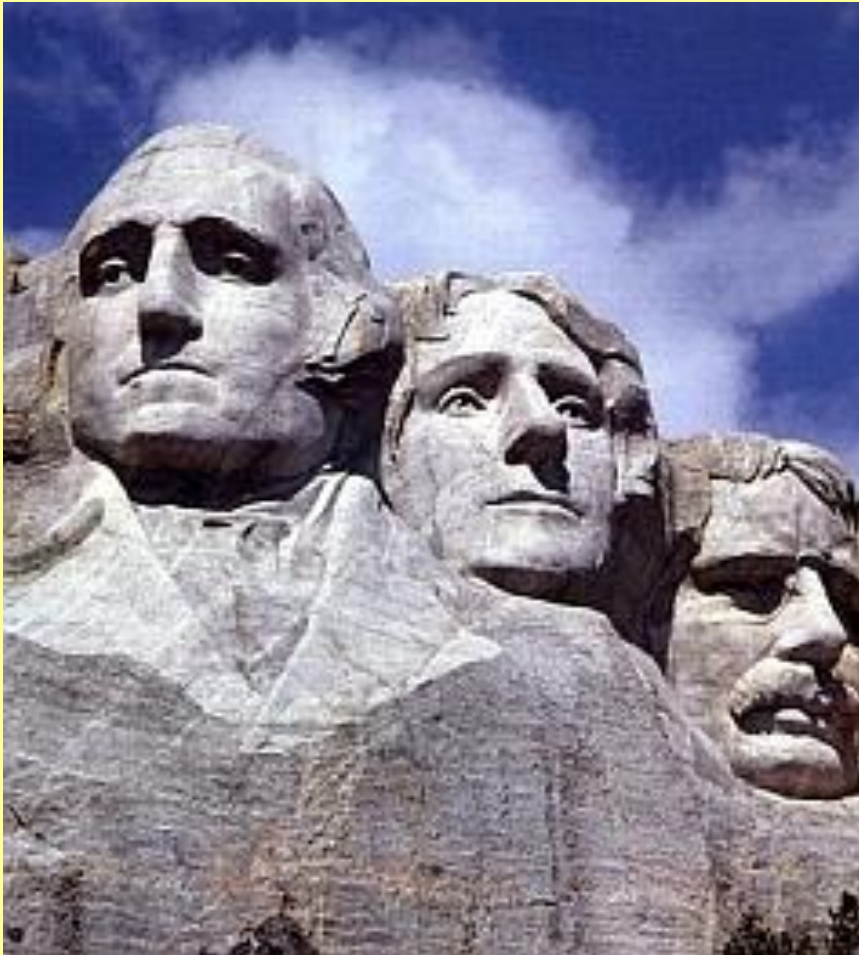
materiał warstwy strukturalnej: polisilikon
materiał warstwy traconej: SiO_2



Mikro lustro (Lucent Technologies)

Mikroobróbka objętościowa (*Bulk Micromachining*)

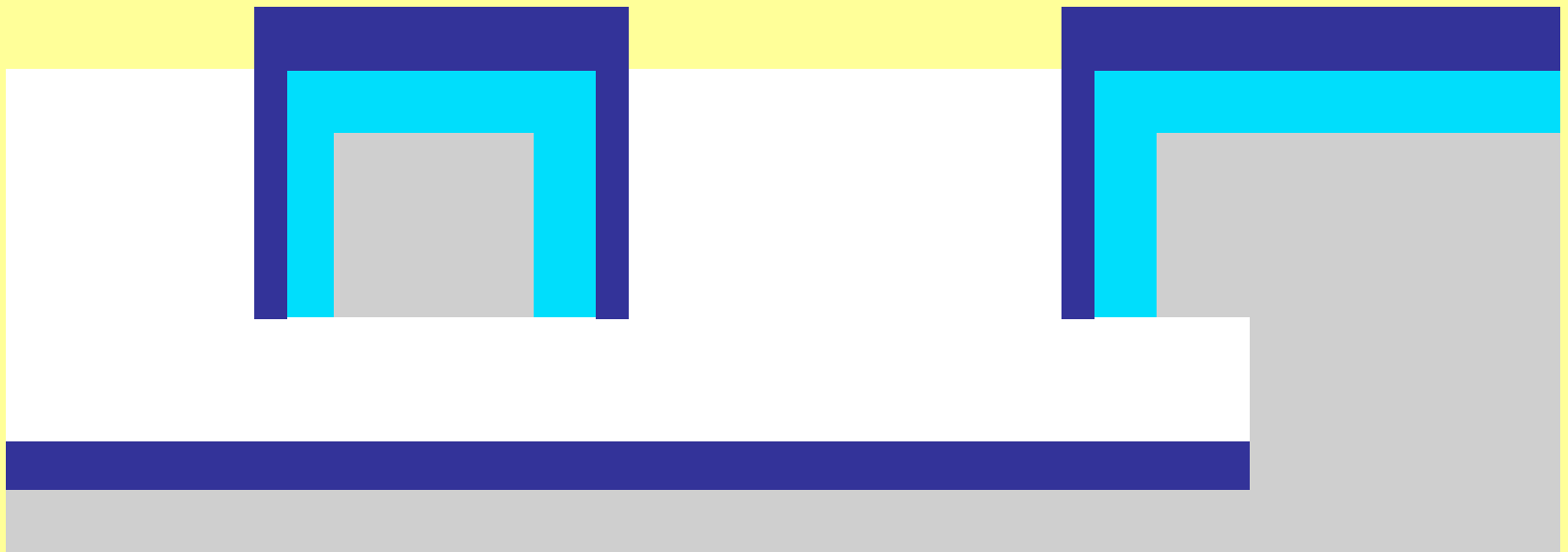
Jak rzeźbiono górę Rushmore?



1. Wystartowano z ogromnego bloku
2. Usunięto wszystko, co nie przypomina prezydentów

tworzenie struktury

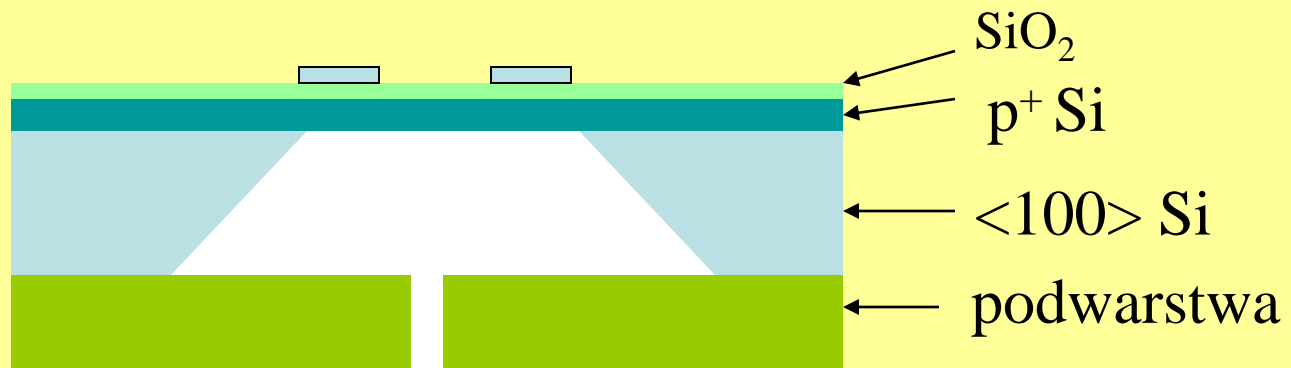
Proces SCREAM (single-crystal reactive etching and metallization)



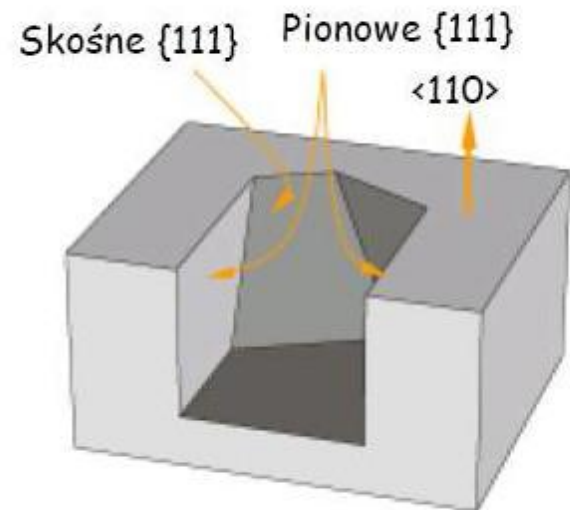
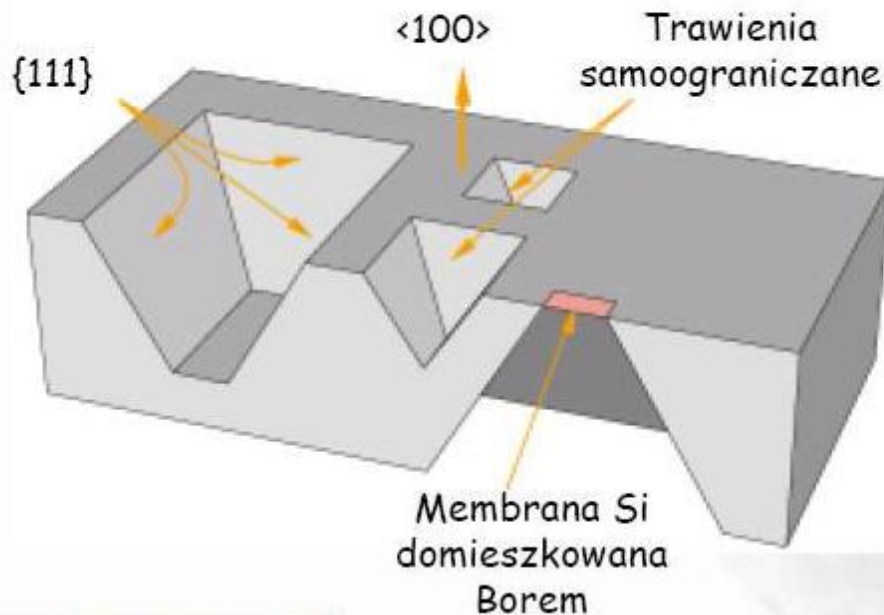
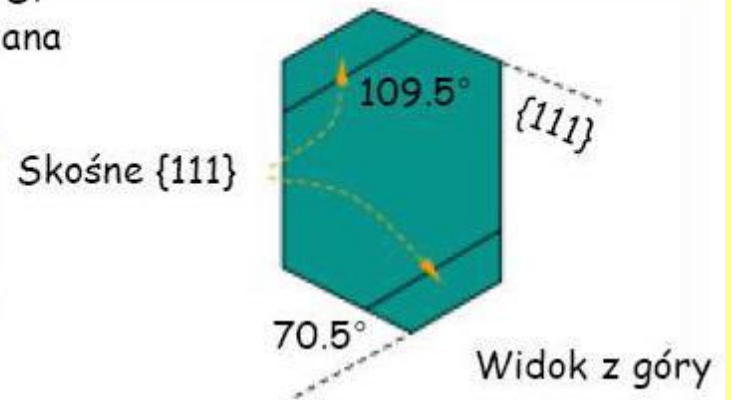
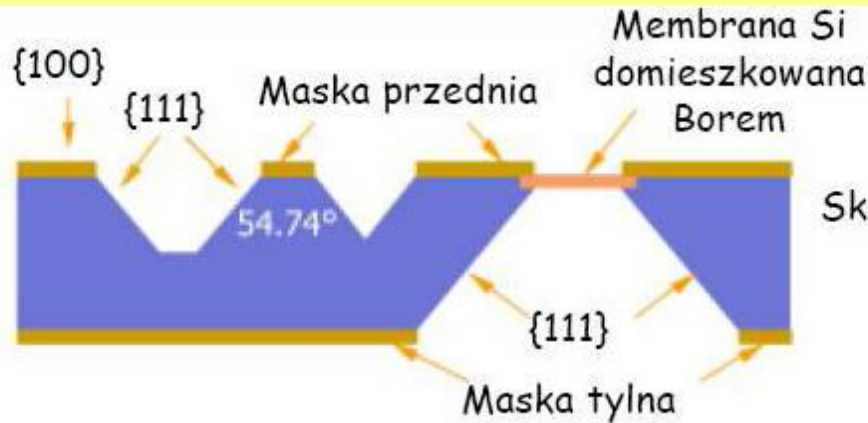
Tworzenie warstwy metalowej ($\sim 0.2 \mu\text{m}$)

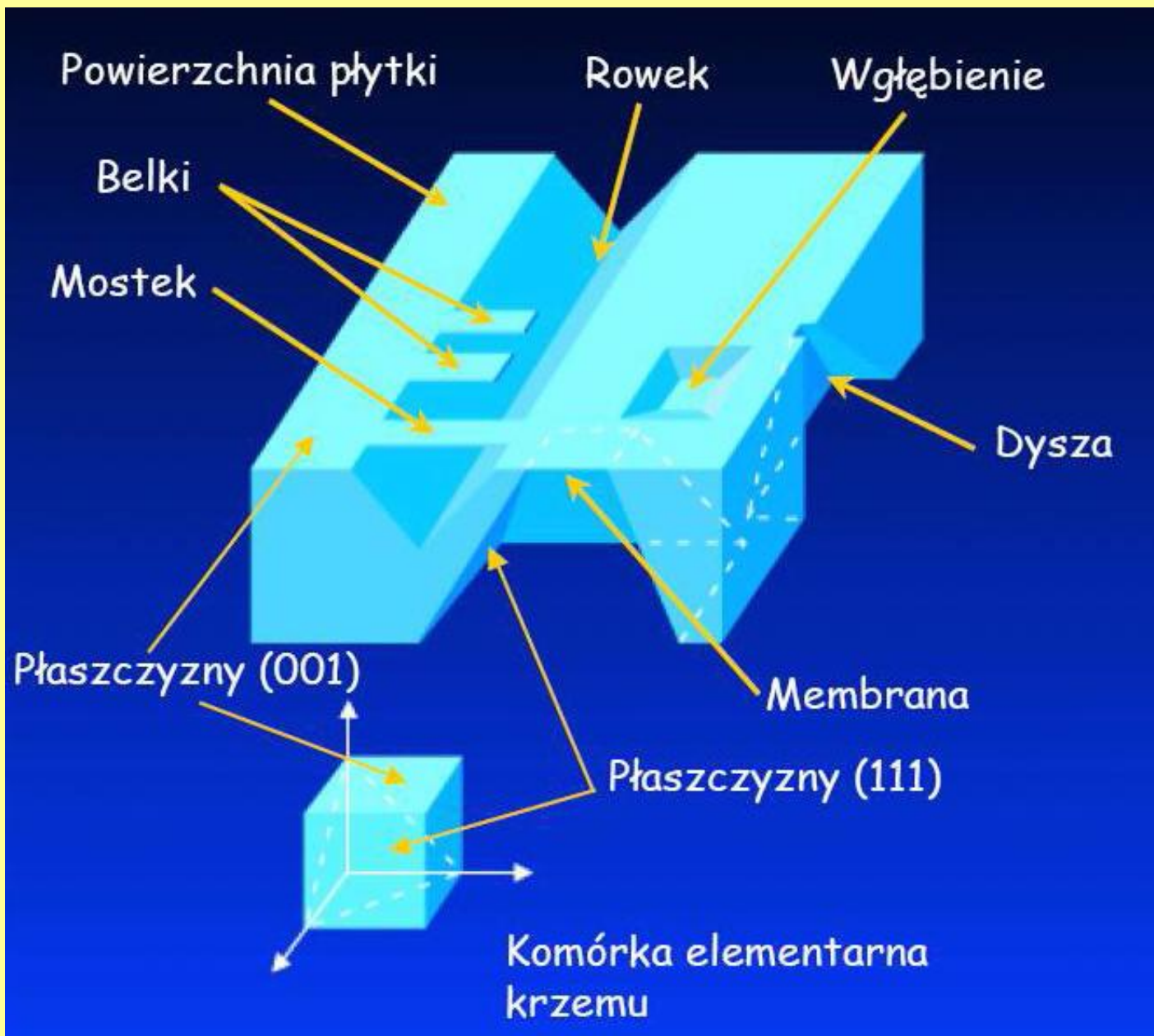
czujniki ciśnienia

Piezorezystywne elementy

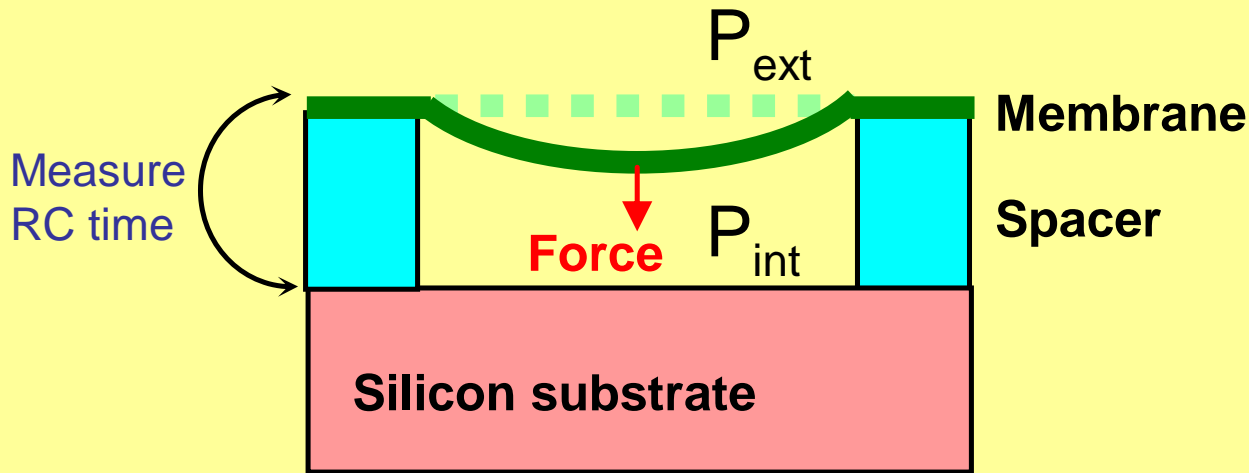


anizotropowe trawienie mokre krzemu

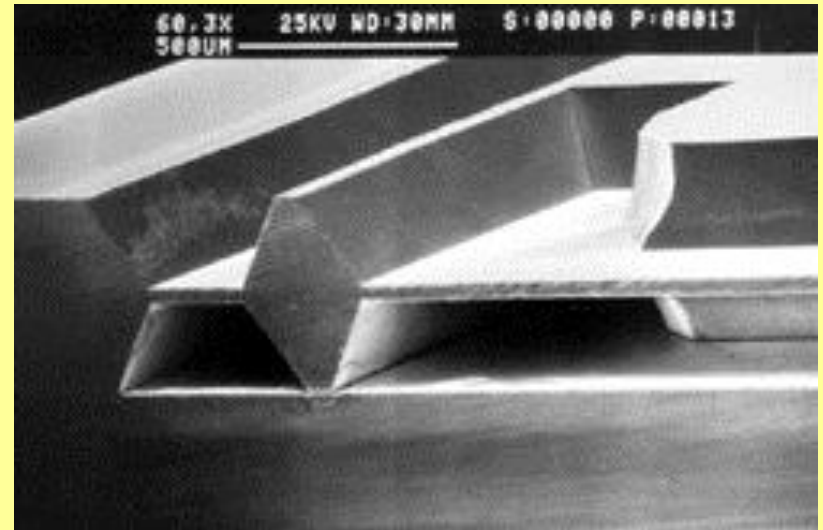




typowe urządzenia MEMS wytworzone mikroobróbką objętościową



pojemnościowy czujnik ciśnienia



piezoryzystwny czujnik ciśnienia

LIGA (*High Aspect Ratio Micromachining*)

*Jak wytworzyć dużo
plastikowych żołnierzyków?*



1. Wytworzyć formę
2. Wytworzyć żołnierzyki poprzez wtrysk plastiku do formy
3. Wykorzystać formę powtórnie



LIGA

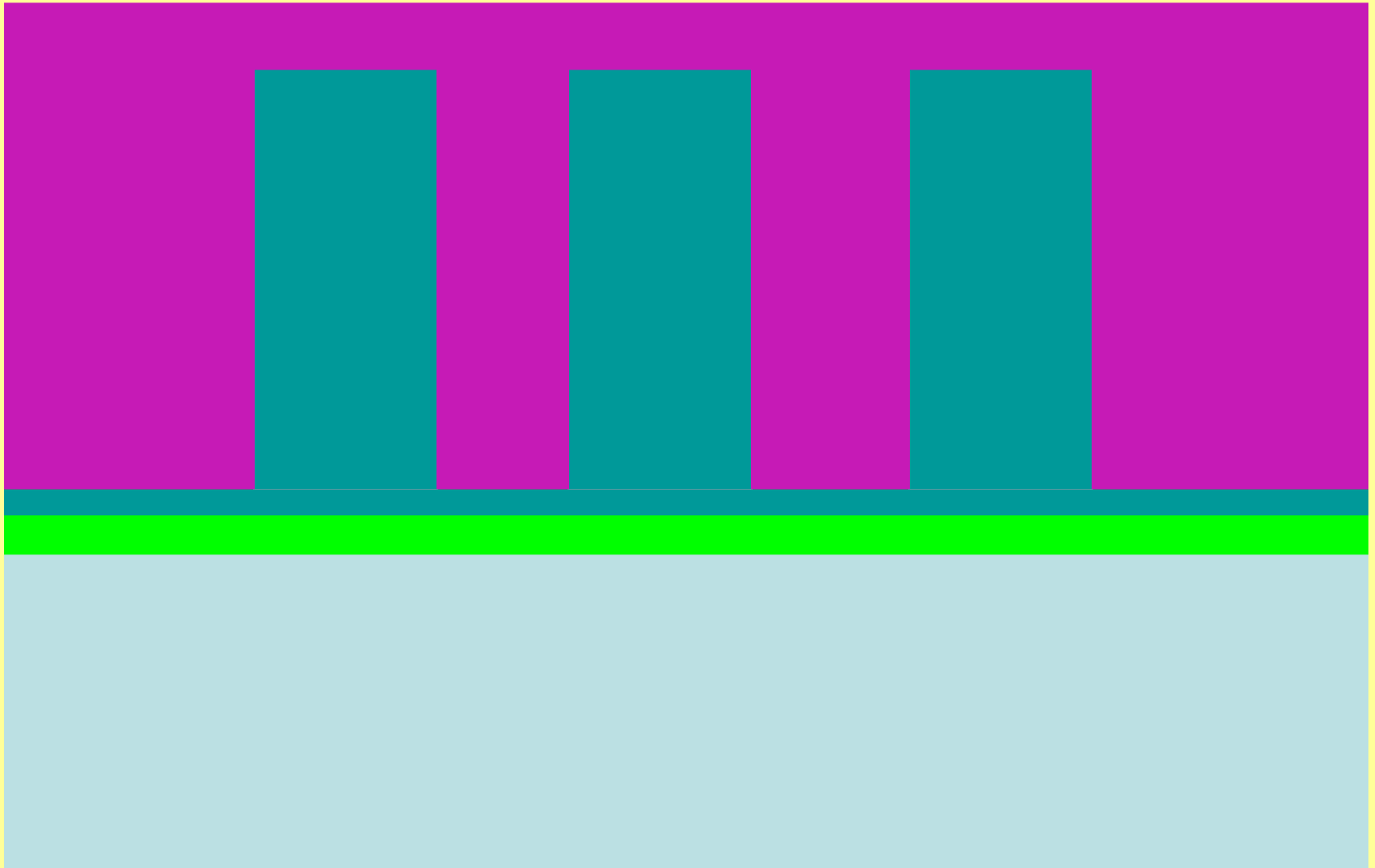
Lithographie, Galvanoformung, and Abformung

Lithographie – litografia

Galvanoformung- kształtowanie galwaniczne postaci konstrukcyjnej

Abformung – formowanie molding innych materiałów w pomniejszone struktury

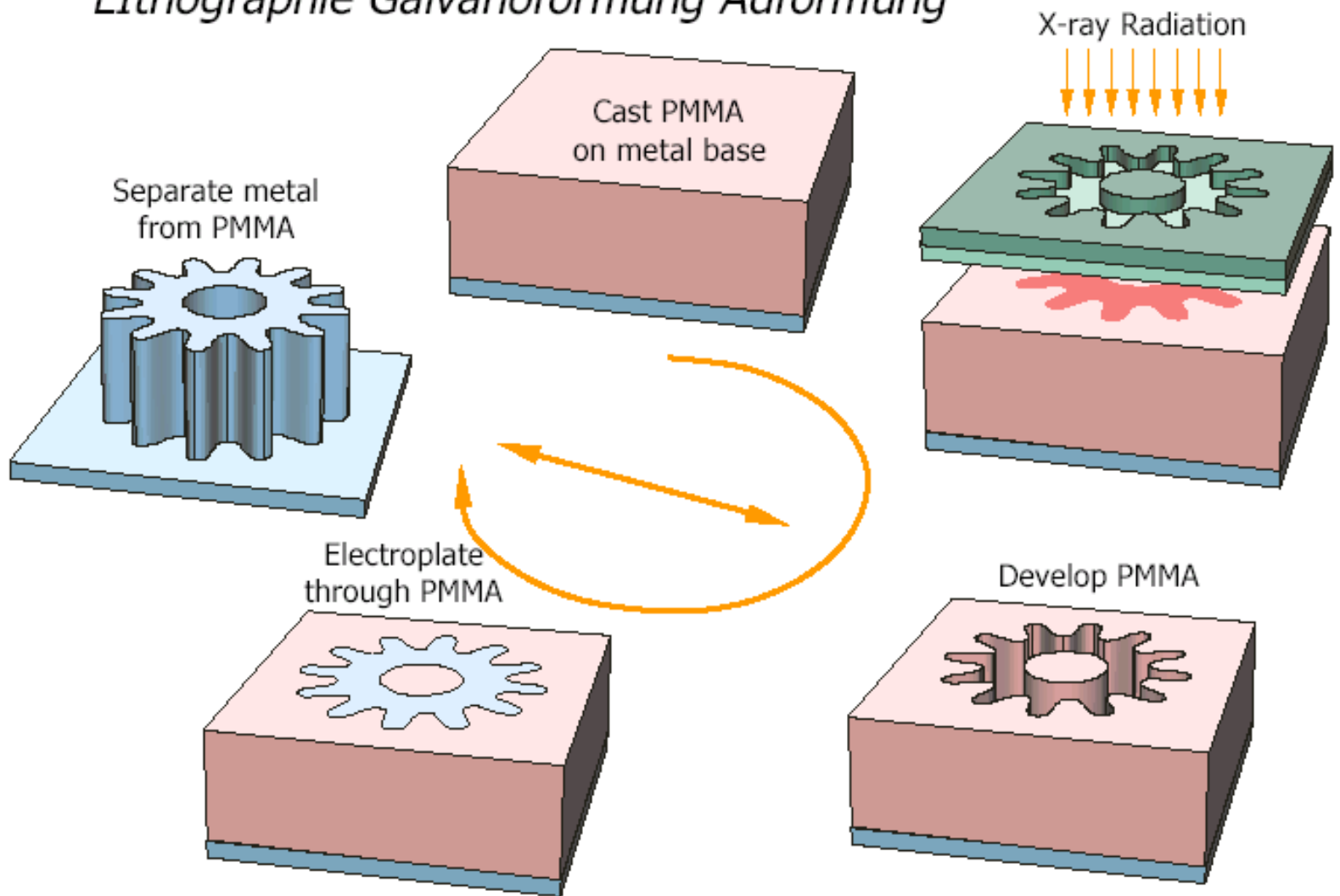
tworzenie struktury



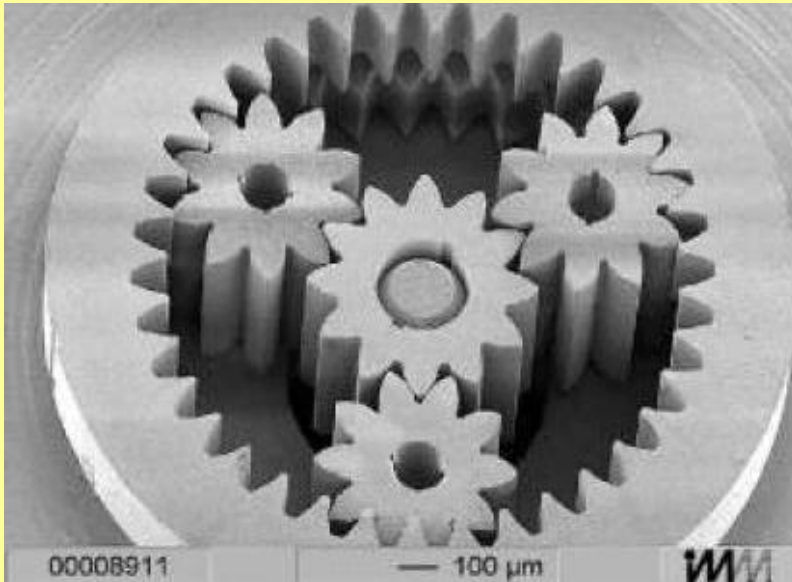
Usuwanie wtrysniętego plastyku ze stałej formy.

proces LIGA

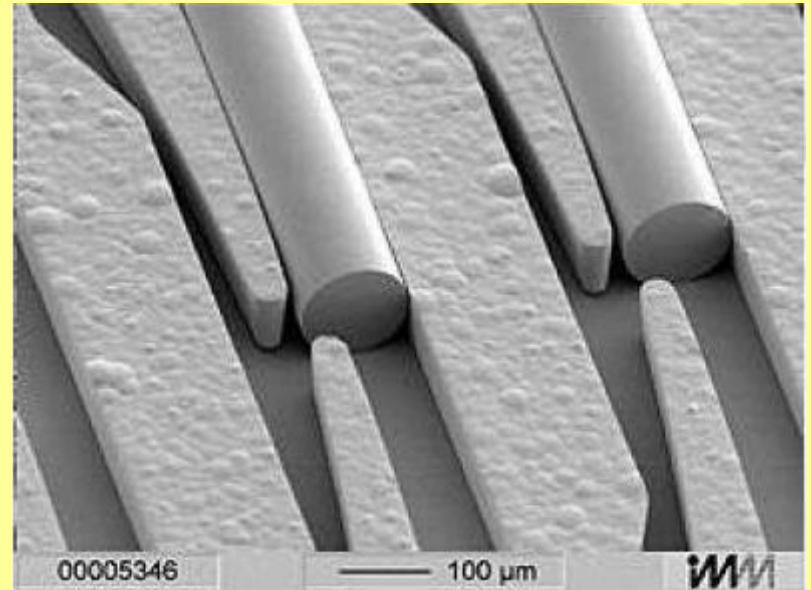
Lithographie Galvanoformung Adformung



LIGA proces- przykłady



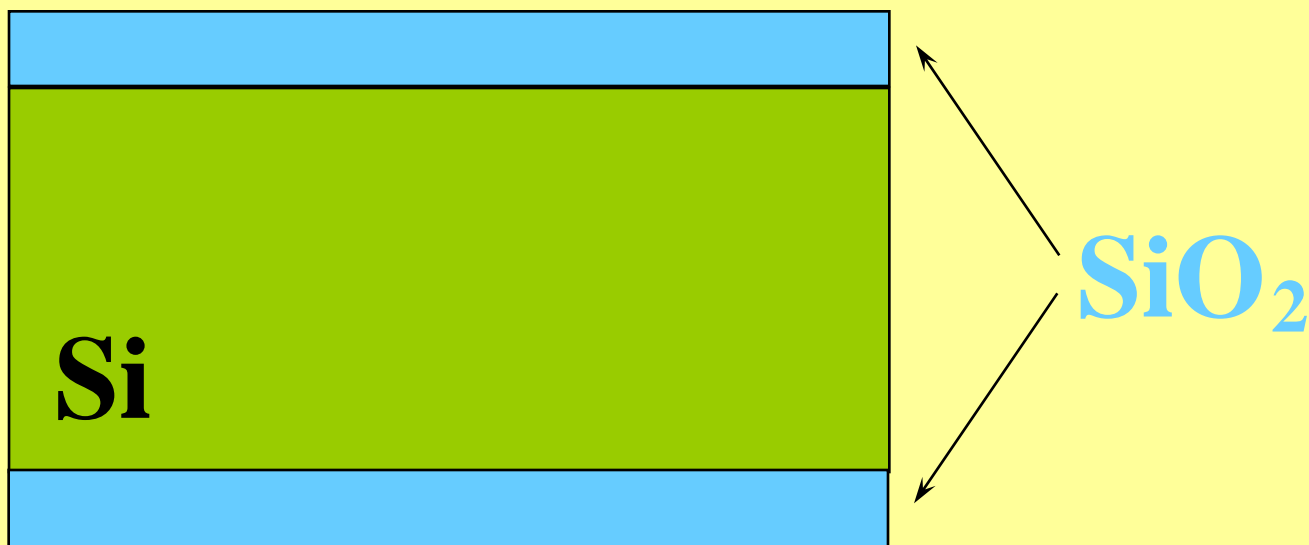
Struktura mechaniczna systemu sprzężenia światłowodów wytworzona technologią UV- *LIGA*



Miniaturowa przekładnia epicykloidalna do zastosowania w silnikach elektromagnetycznych (Ni).

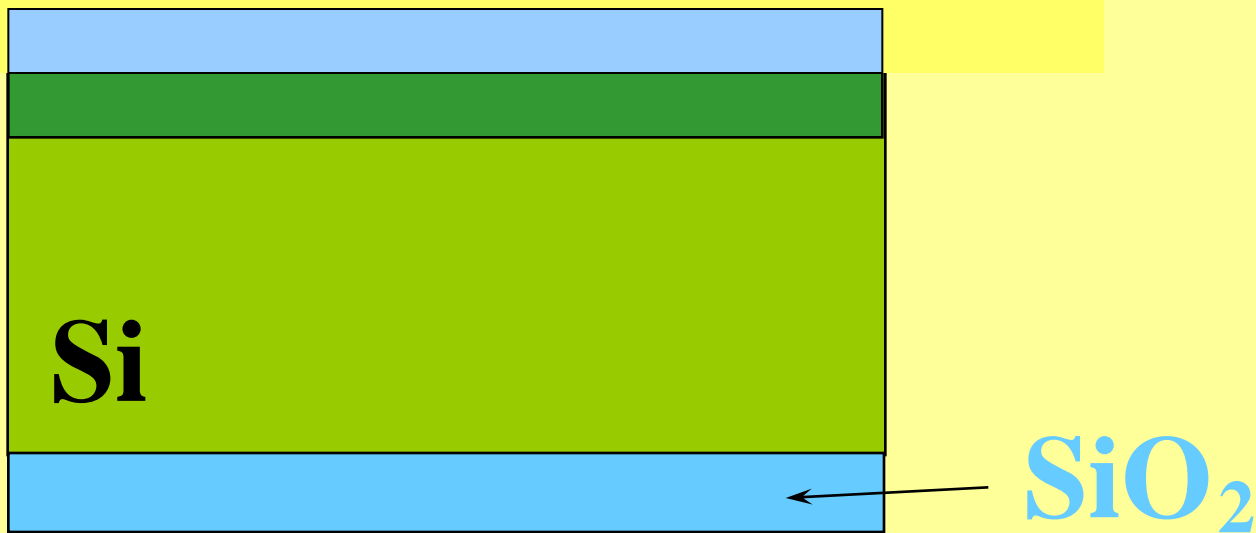
WYTWORZENIE MEMBRANY KRZEMOWEJ

I etap → **UTLENIANIE**



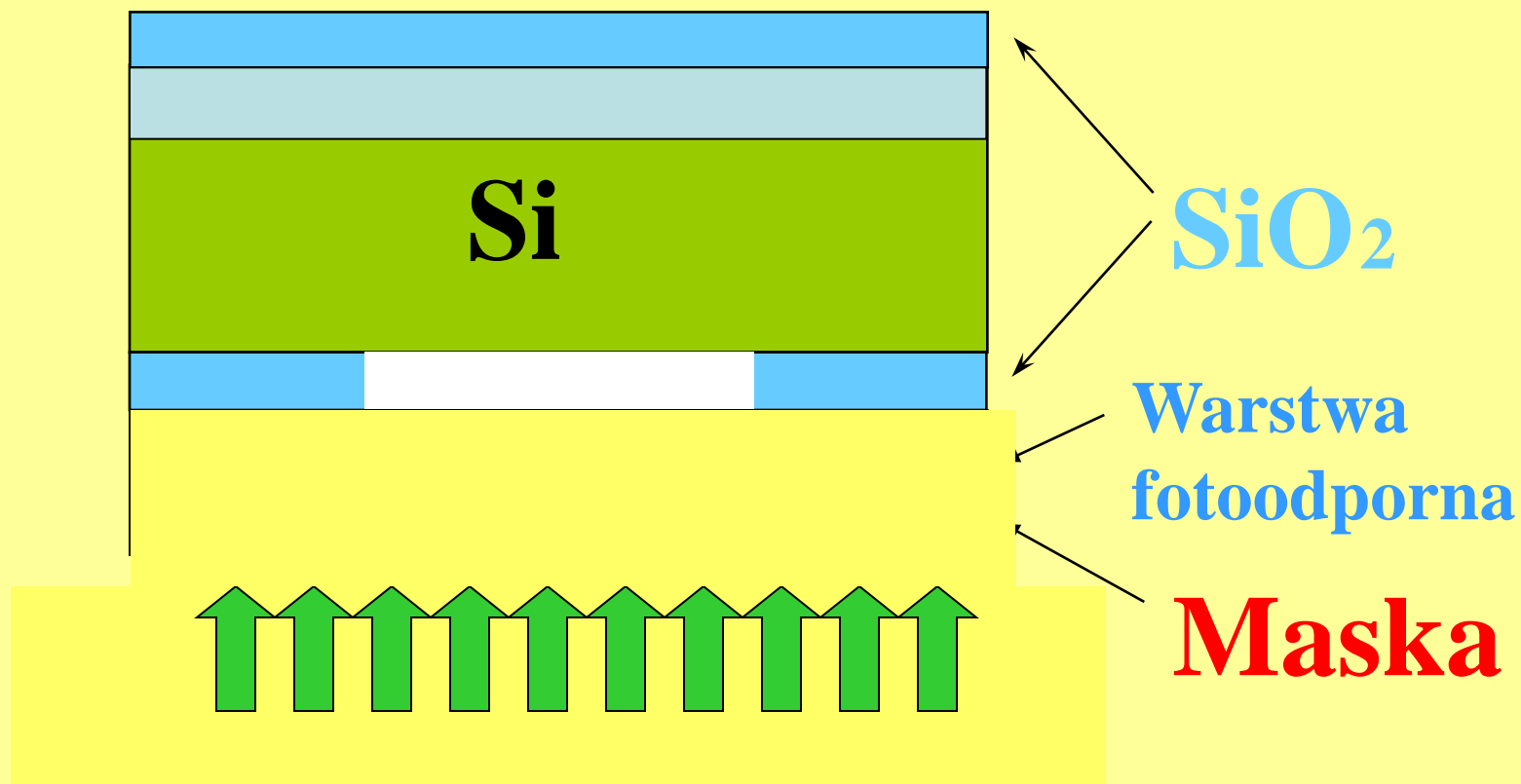
WYTWORZENIE MEMBRANY KRZEMOWEJ

II etap → **DOMIESZKOWANIE BOREM**



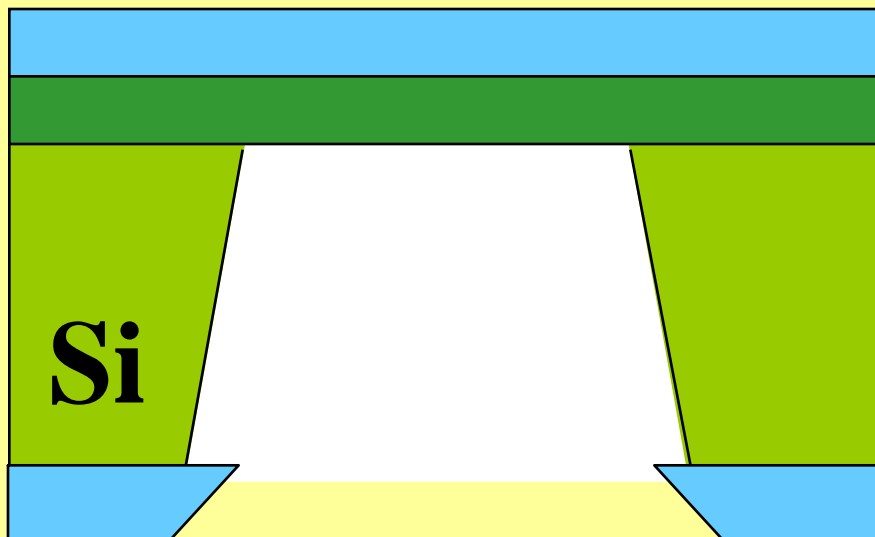
WYTWORZENIE MEMBRANY KRZEMOWEJ

III etap → **FOTOLITOGRAFIA**



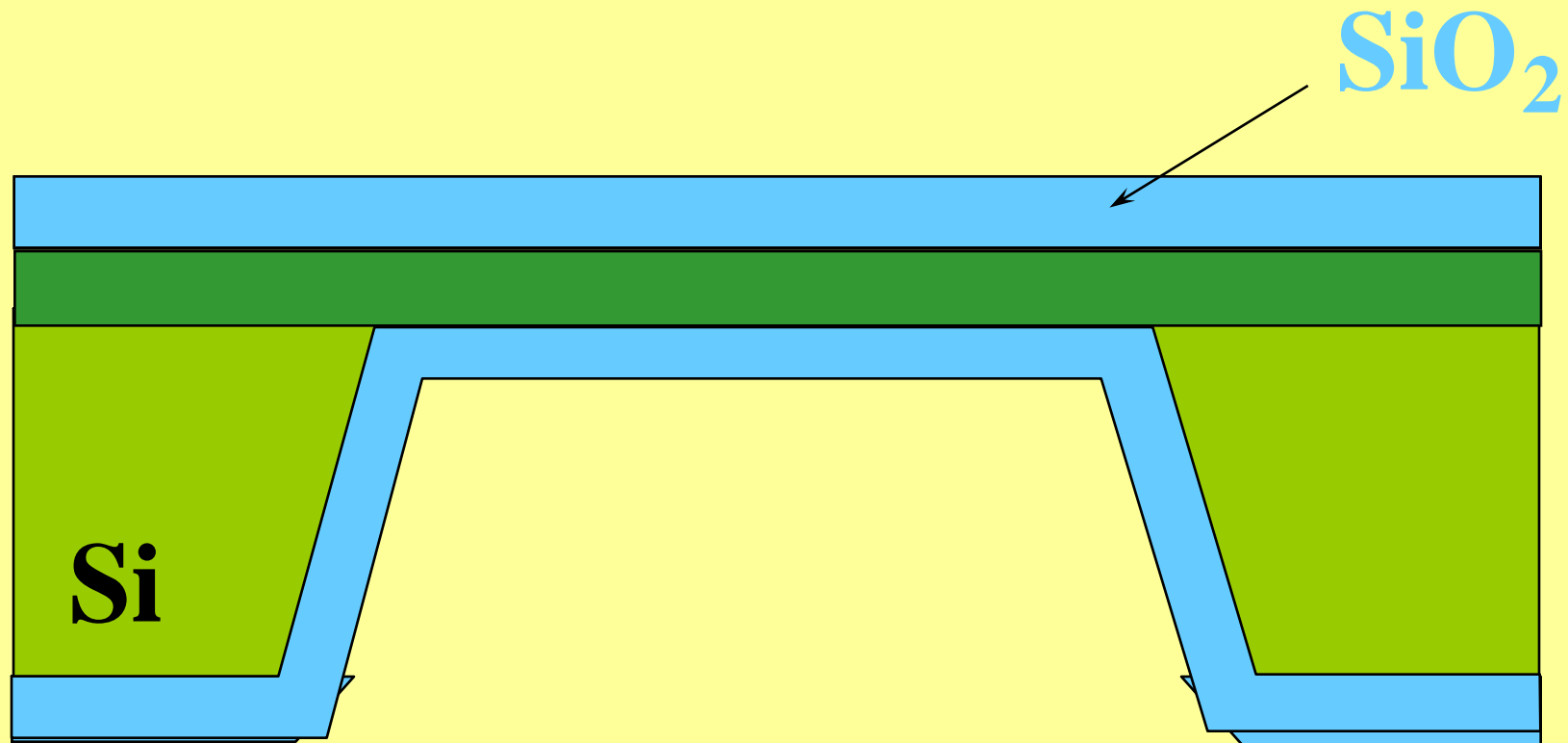
WYTWORZENIE MEMBRANY KRZEMOWEJ

IV etap → **TRAWIENIE KRZEMU**

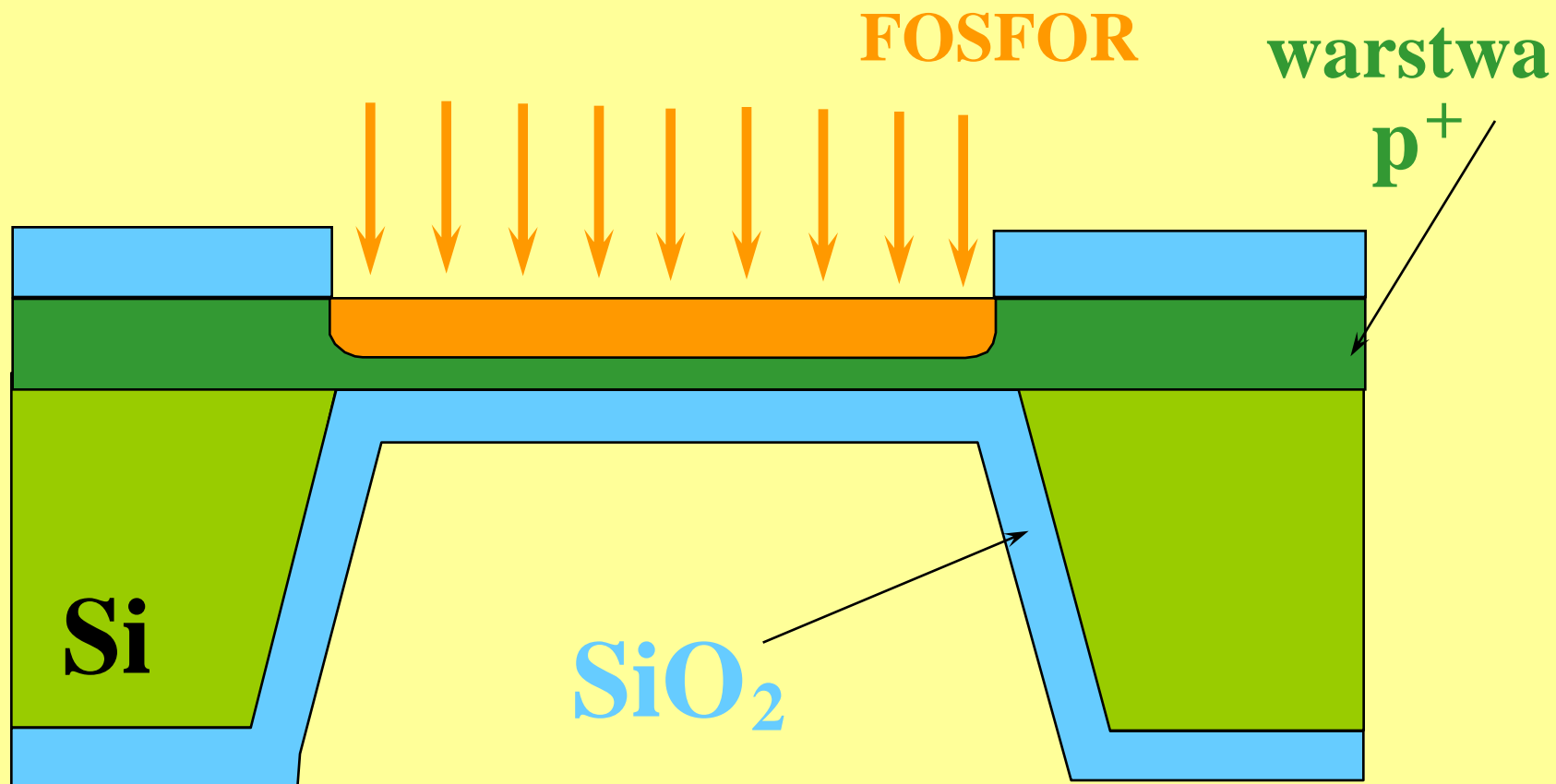


WYTWORZENIE MEMBRANY KRZEMOWEJ

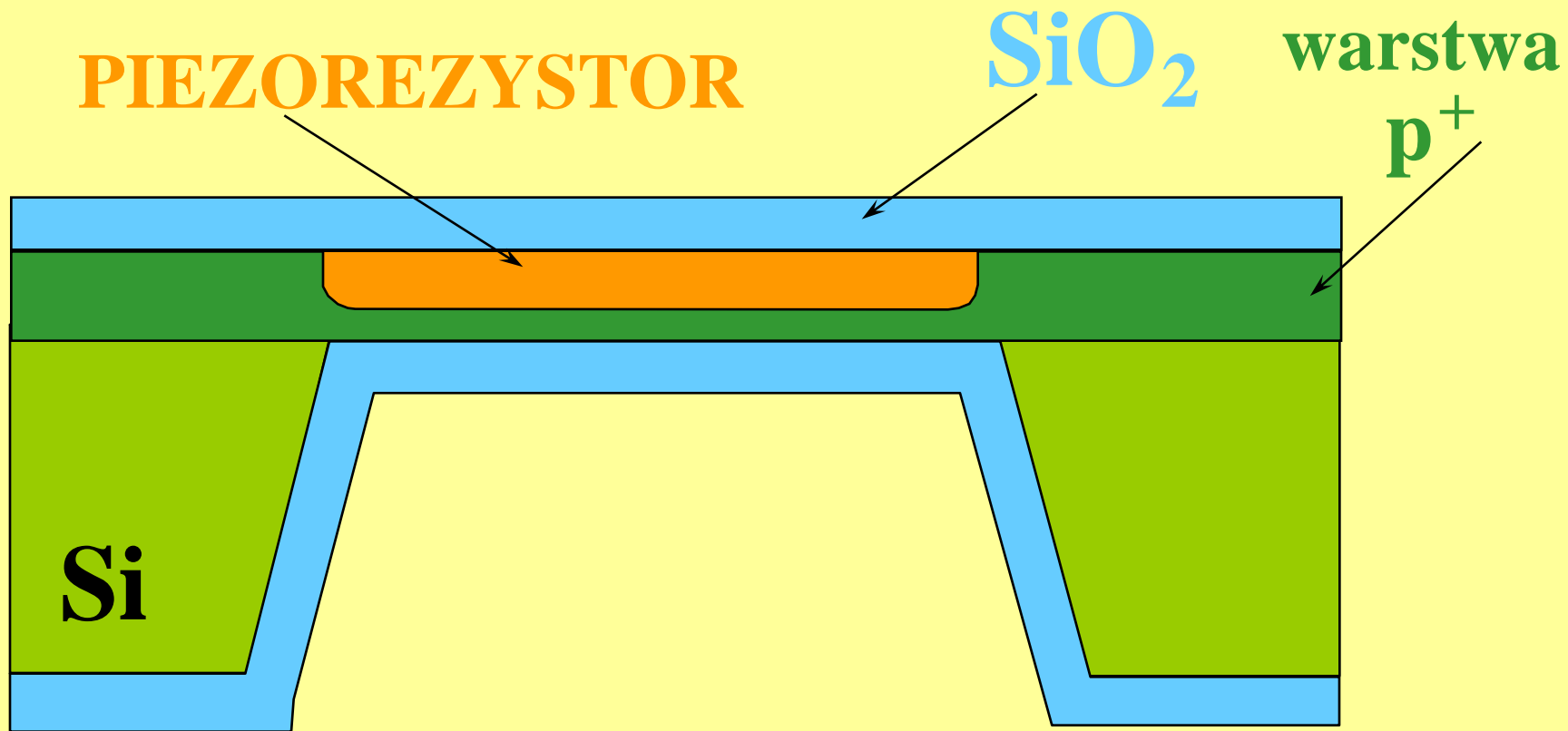
V etap → **TRAWIENIE SiO_2 I UTLENIANIE**



WYTWORZENIE STRUKTURY CZUJNIKA



WYTWORZENIE STRUKTURY CZUJNIKA

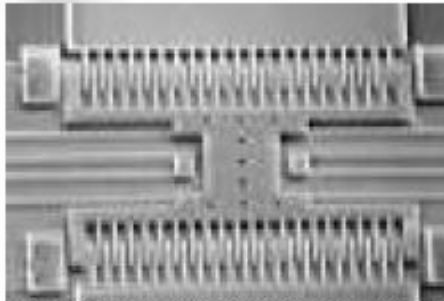


Systemy mikroelektromechaniczne MEMS

1. Ogólna charakterystyka
2. Technologia wytwarzania
3. **Przykłady zastosowań**

Poziomy MEMSów

2-poziomy



Mikrorezonator - silnik i czujnik elektrostatyczny

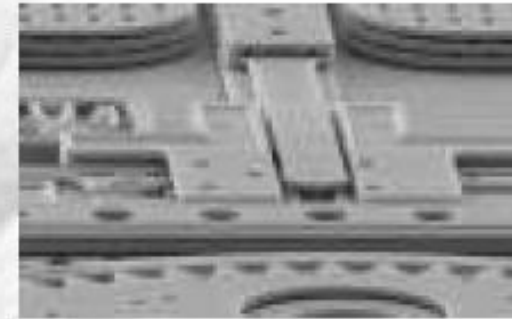
3-poziomy



4-poziomy

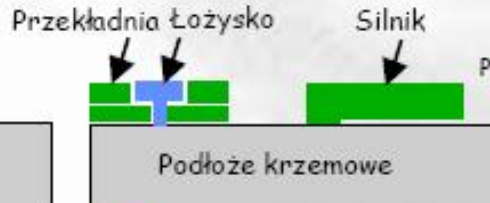


5-poziomów



- Warstwa #1 polikrzemu

Czujniki



- Warstwa #1 polikrzemu
- Warstwa #2 polikrzemu

Zaawansowane czujniki
Proste aktulatory



- Warstwa #1 polikrzemu
- Warstwa #2 polikrzemu
- Warstwa #3 polikrzemu

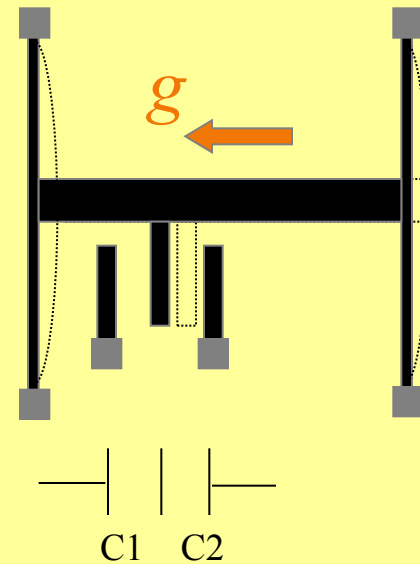
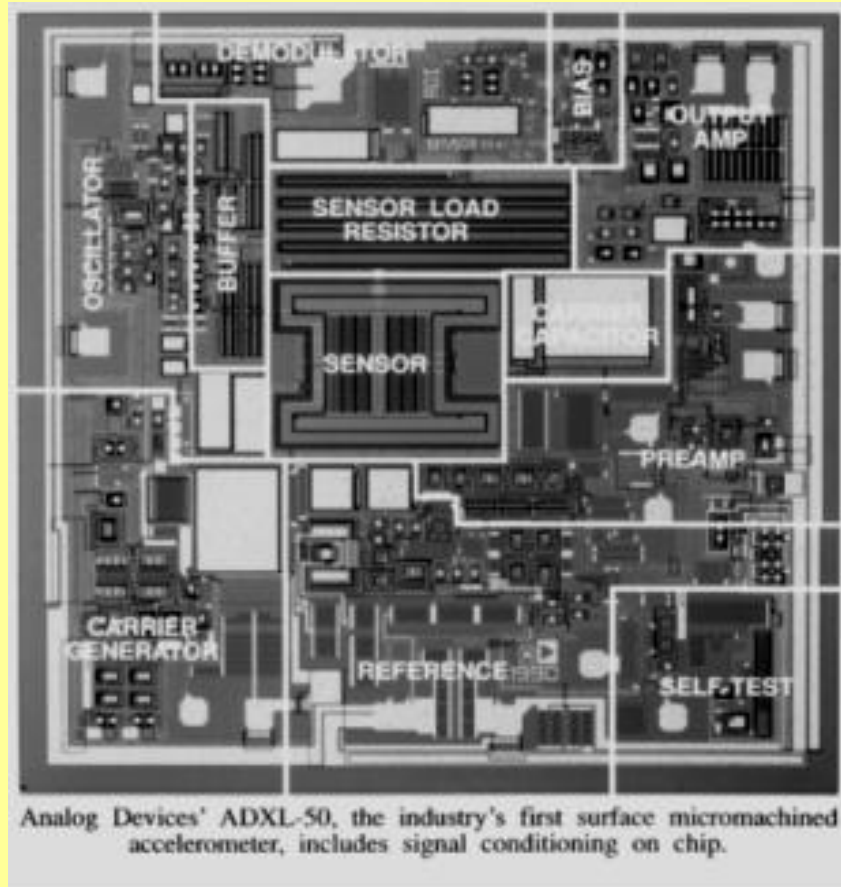
Zaawansowane aktulatory

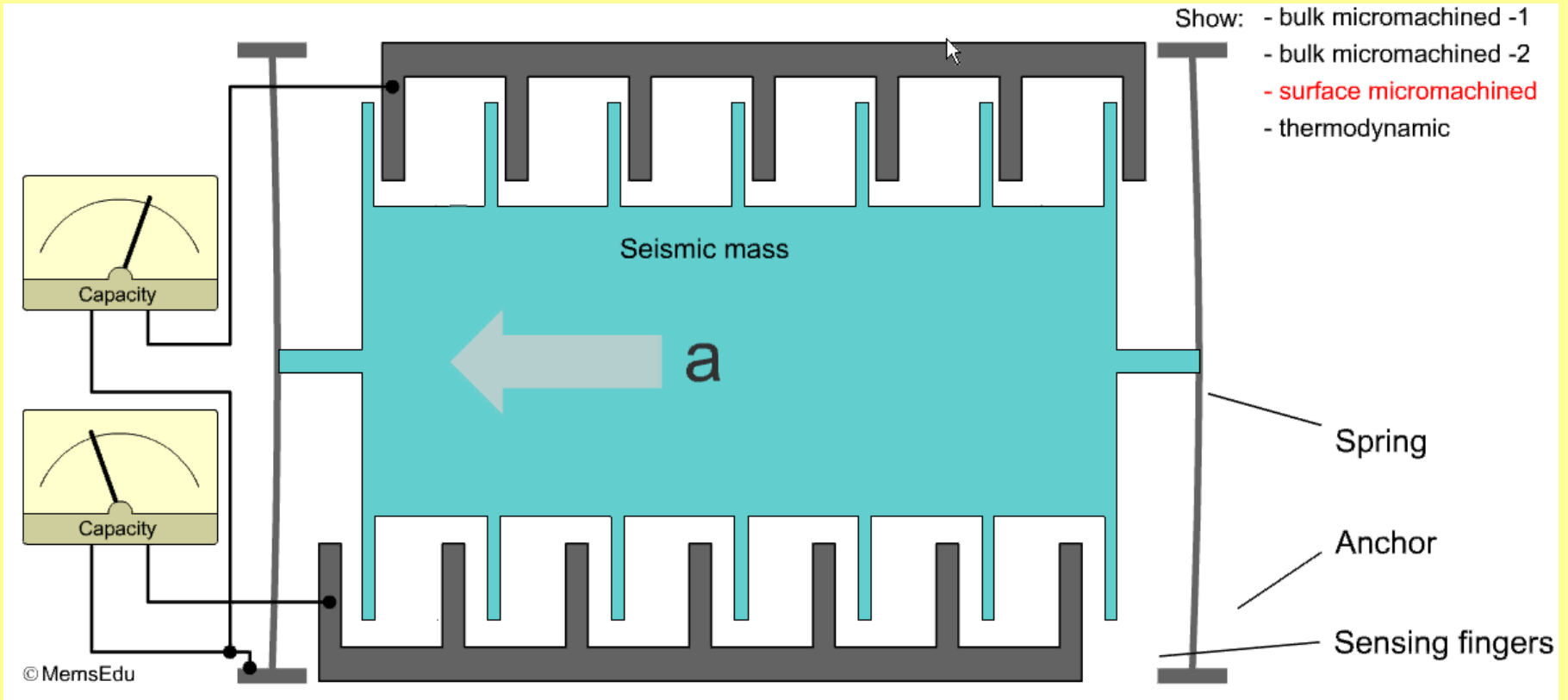


- Warstwa #1 polikrzemu
- Warstwa #2 polikrzemu
- Warstwa #3 polikrzemu
- Warstwa #4 polikrzemu

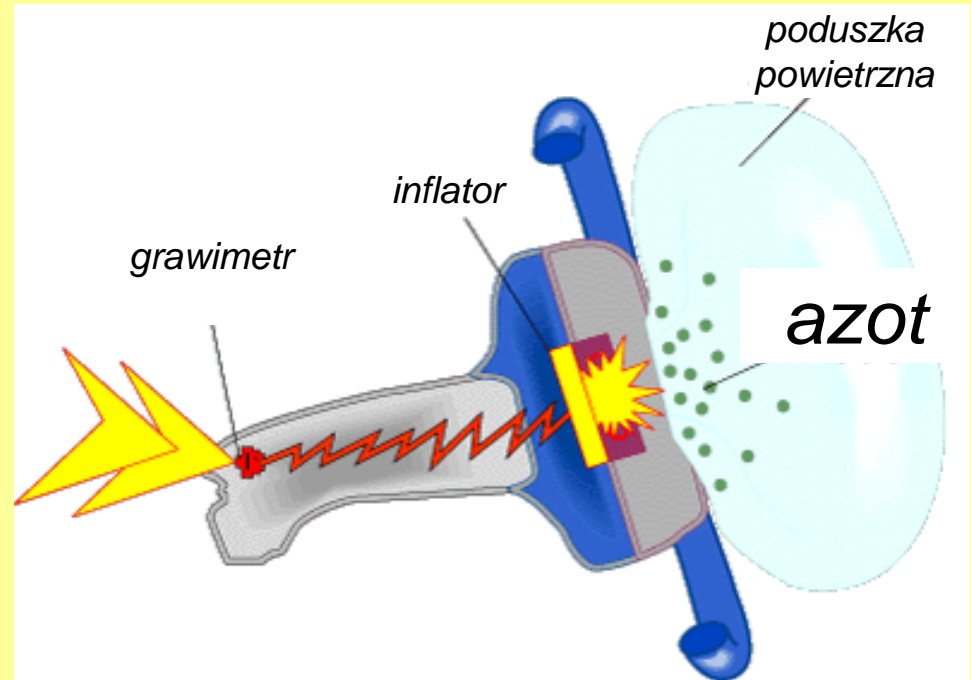
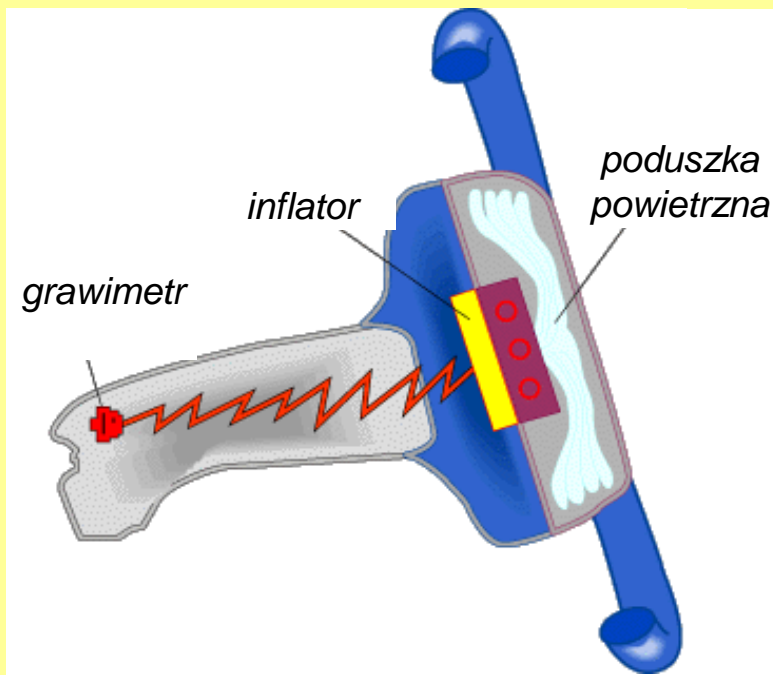
Złożone systemy

Akcelerometr

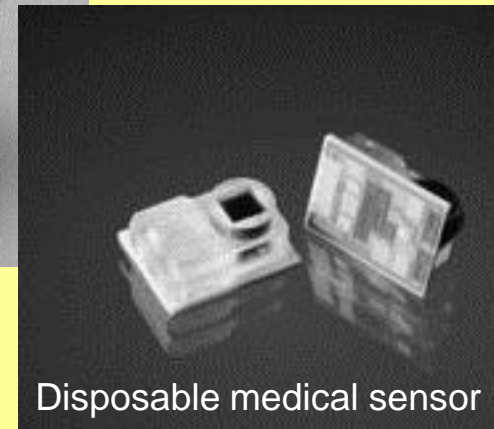
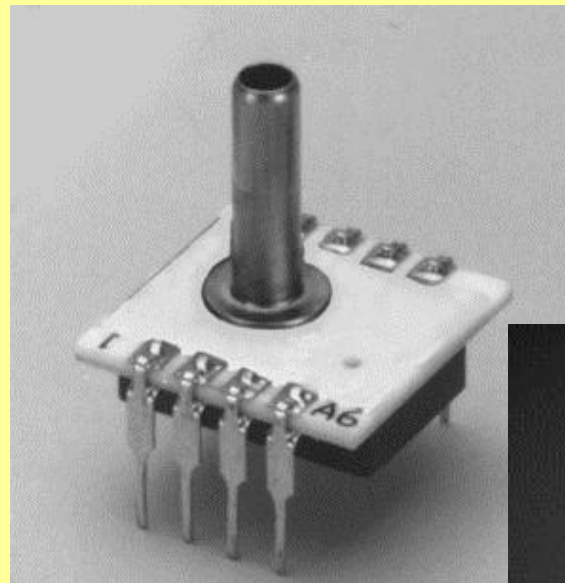
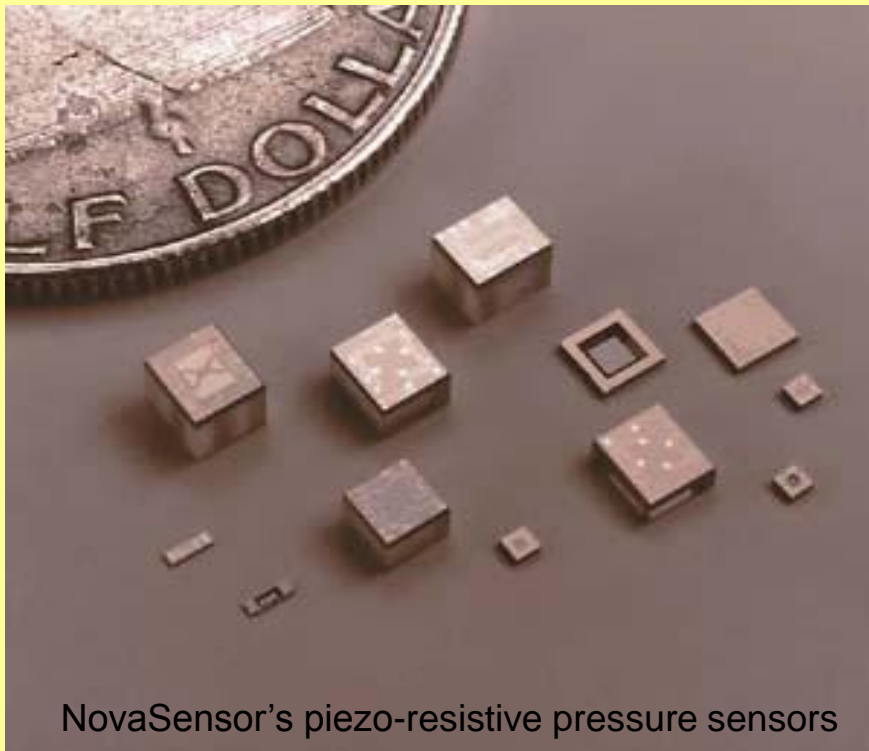
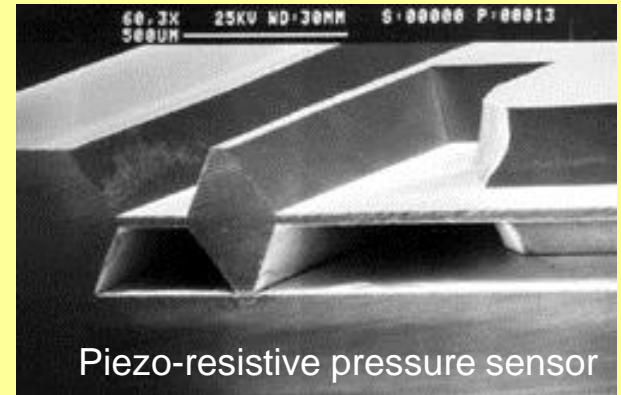
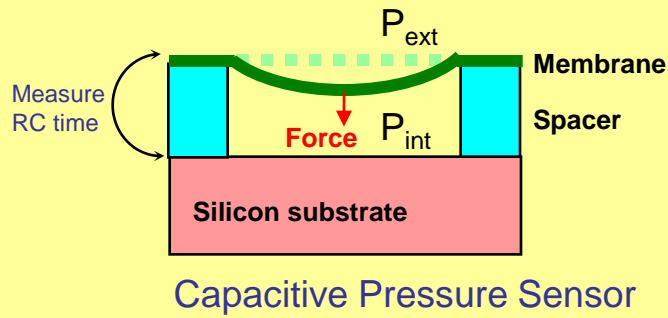
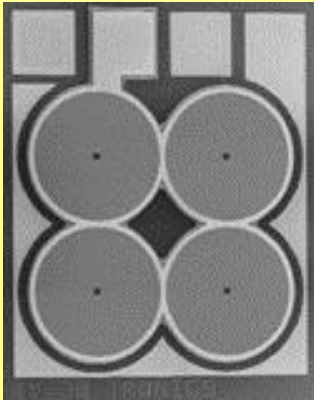




Akcelerometr (grawimetr) samochodowej poduszki bezpieczeństwa



czujniki ciśnienia



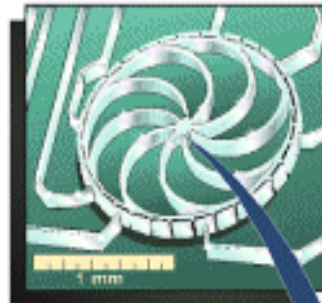
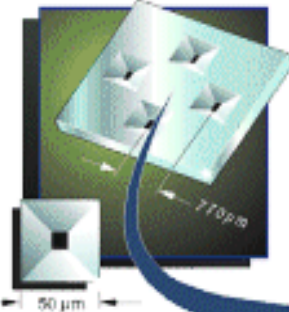
Czujniki MEMS w samochodzie

Micromachined Transducer

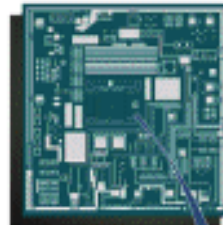
Applications for Automotive Operation & Safety

Inertial Navigation Sensors
• Acceleration
• Yaw Rate

Silicon Nozzles for Fuel Injection



Fuel Pressure Sensor



Microphones for Noise Cancellation

Airbag Side Impact Sensor

Fuel Sensors
• Level
• Vapor Pressure

Air-Conditioning Compressor Sensor

Manifold Air Pressure Sensor

Mass Air Flow Sensor

Force Sensors
• Brakes
• Throttle Pedals

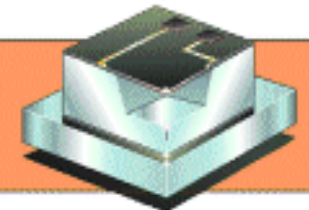
Accelerometer for Suspension Control

Pressure and Inertial Sensors for Braking Control

Crash Sensor

Exhaust Gas Sensor

Tire Pressure Sensors



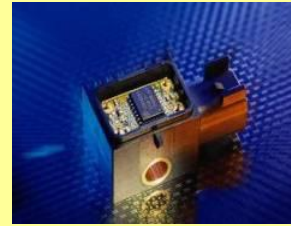
Czujniki samochodowe BOSCH

Inertial Sensors

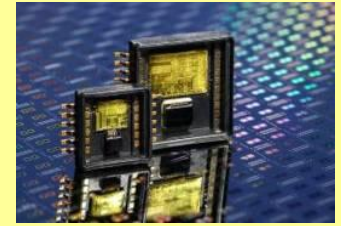
Gyroscopes
(RolloverDetection, Navigation)



Accelerometers
(Airbag, ESP)



Yaw rate sensors
(for ESP systems)



Pressure Sensors

MAP
Manifold Air Intake



BAP
(Engine ECU)



High Pressure
(Common Rail, GDI, Brake)



Media + Weight Sensors

iBolt™ (Occupant Weight)



Climate Control

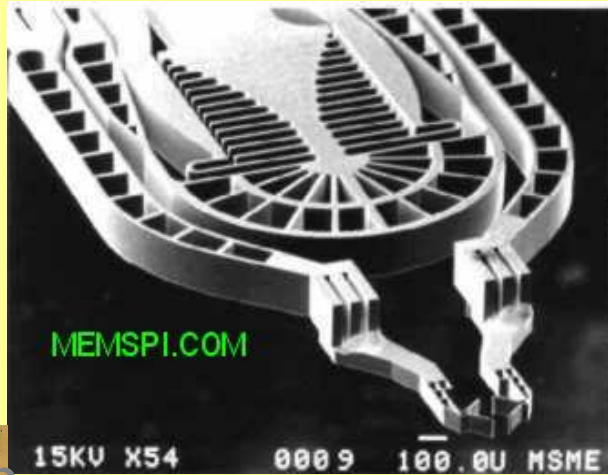


Oil Condition

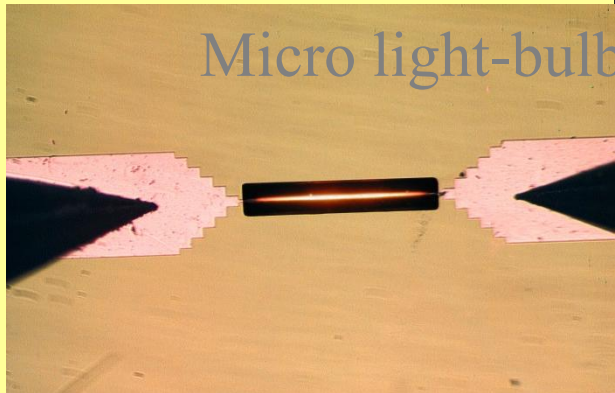


Manufacturing volume in 2006: More than 130 Million Sensors

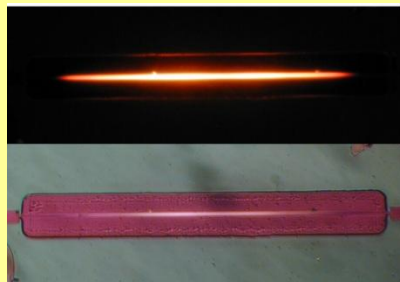
nastawniki (aktuatory)



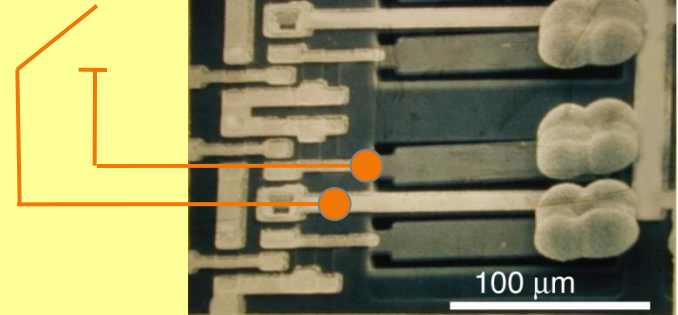
C. Keller
MEMS Precision Instruments
<http://www.memspi.com>



UCDavis

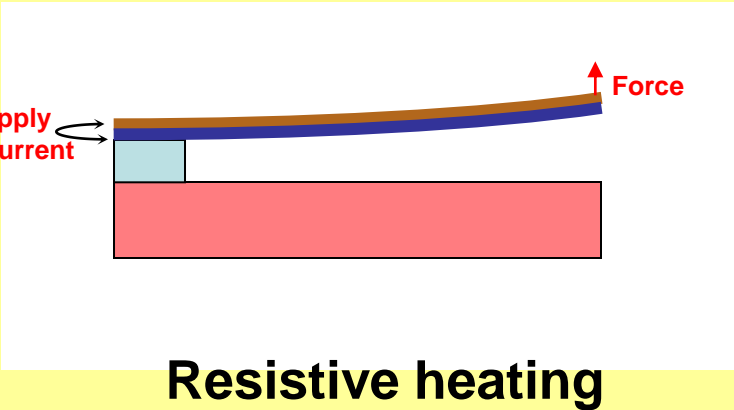
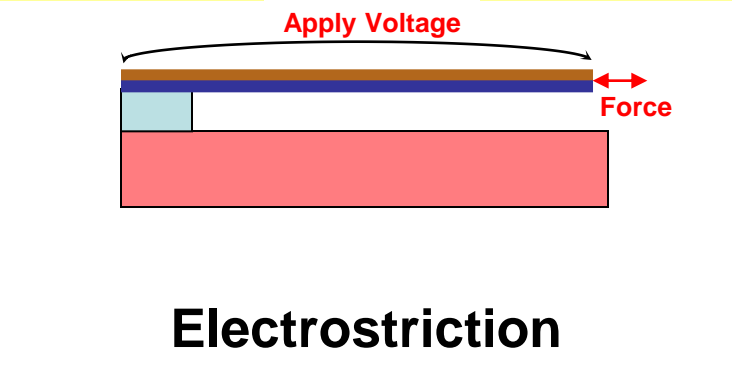
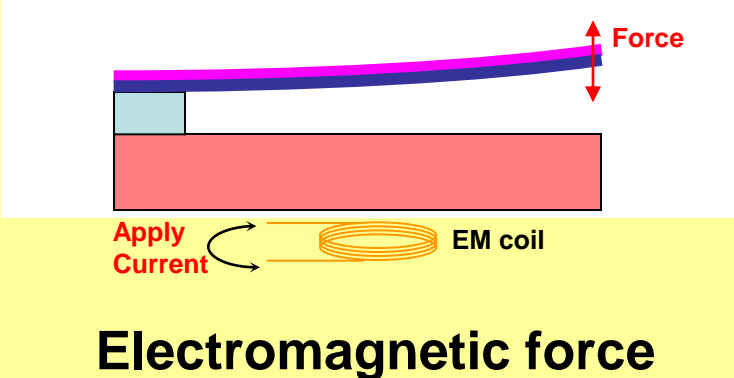
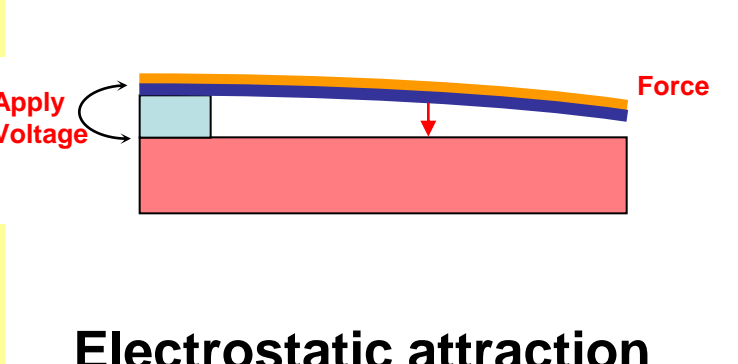


Micro
Switch



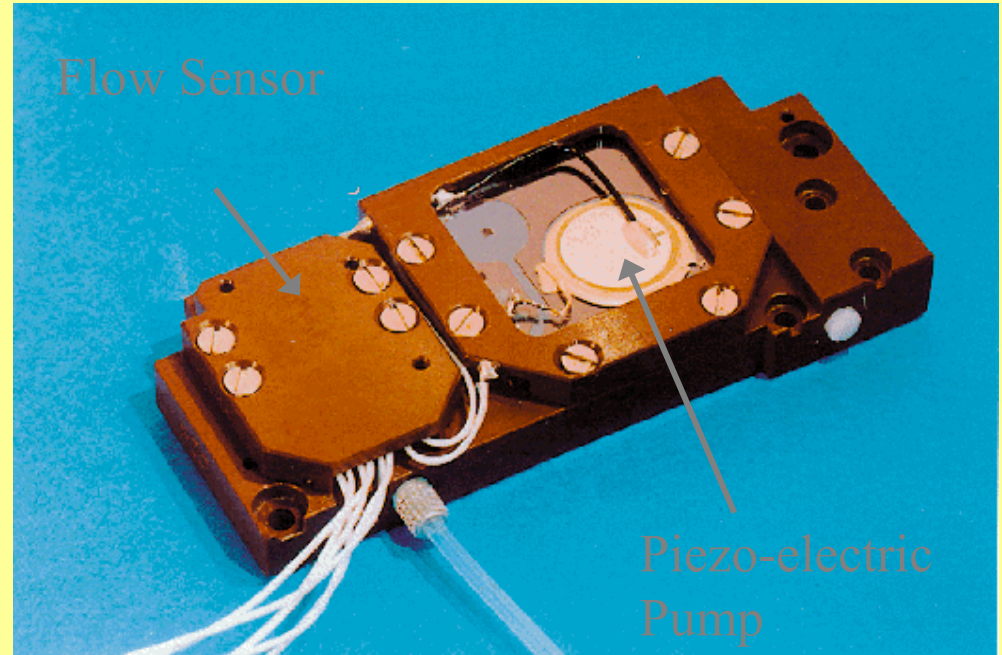
K. Petersen, IBM

Electrical actuation of active MEMS devices



Pompa + czujnik przepływu

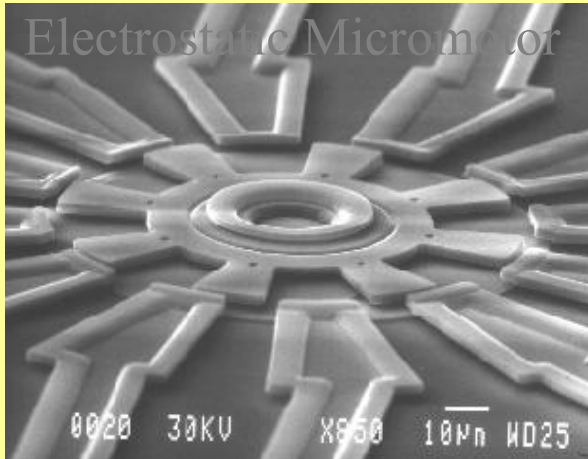
- **Flow**
 - differential pressure across an integrated channel.
- **Pump**
 - piezo-electric disk sitting on top of a thin, silicon membrane.
- **Combined assembly**
 - measures 6.0x2.5x9 cm.



B. Van der Schoot and M. Boillat
University of Neuchatel, Switzerland

Mikrosilniki

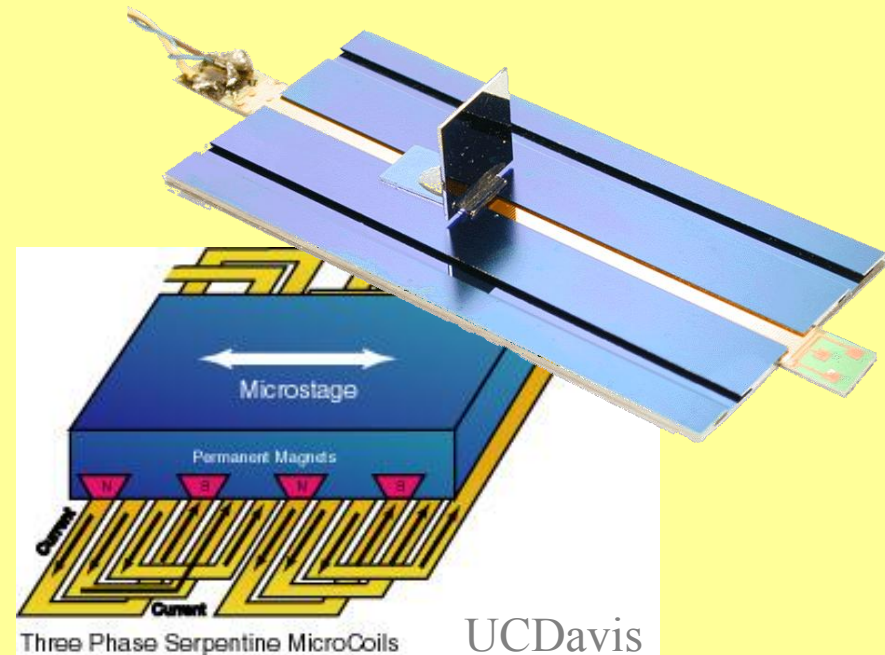
MCNC



- Motors, engines and turbines... all have been made in and on silicon.

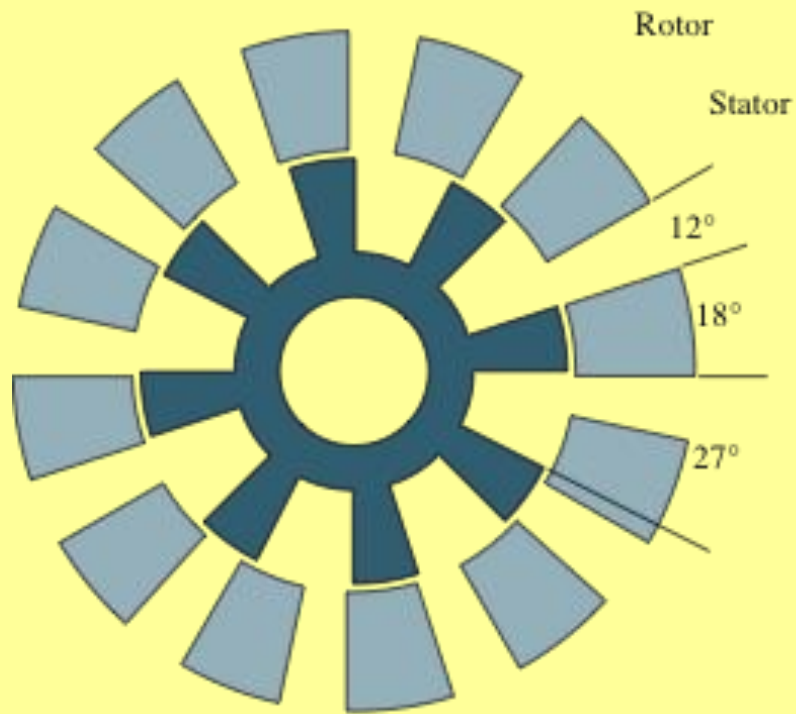


Sandia National Labs

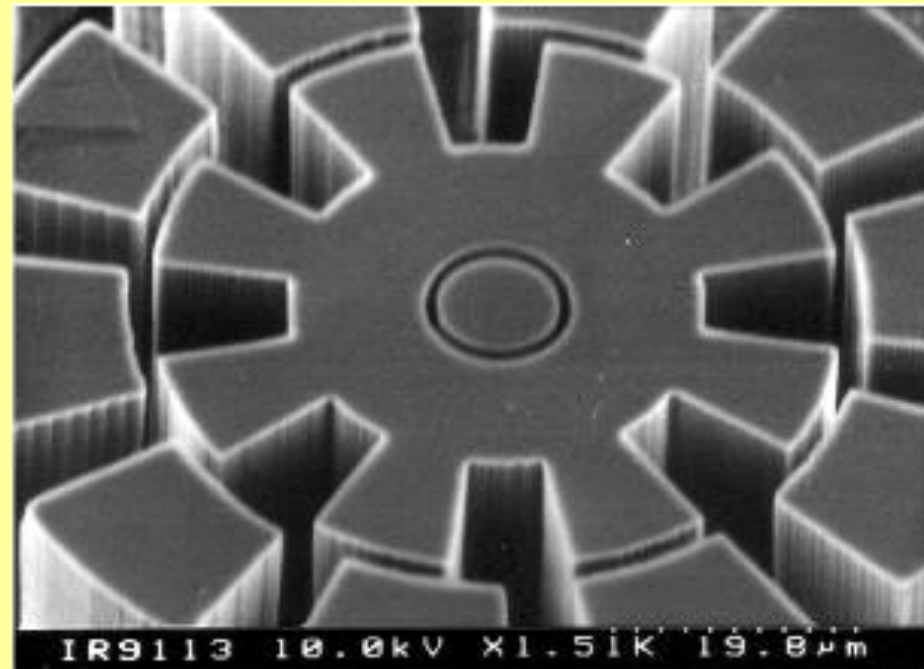


Si Bulk micromachined
Linear Synchronous Motor

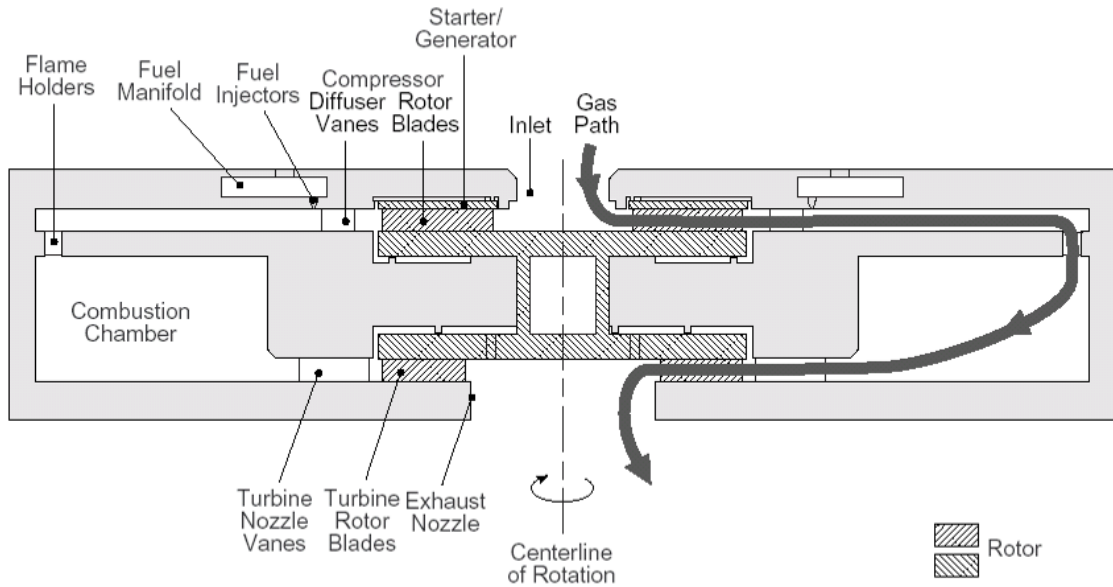
silnik elektrostatyczny



(a)



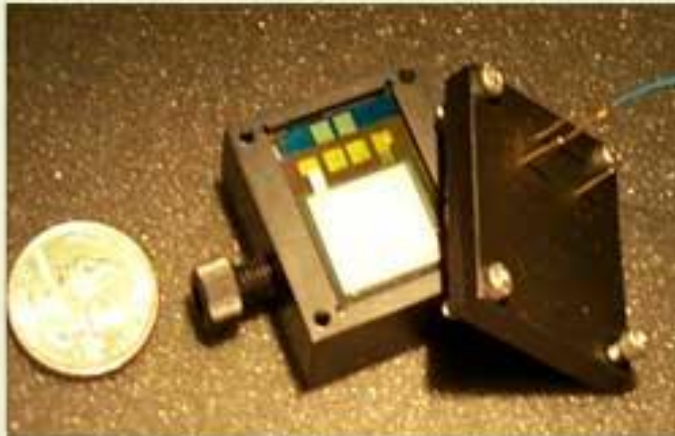
(b)



80 Watt gas microturbine designed and built at MIT for MEMS power applications

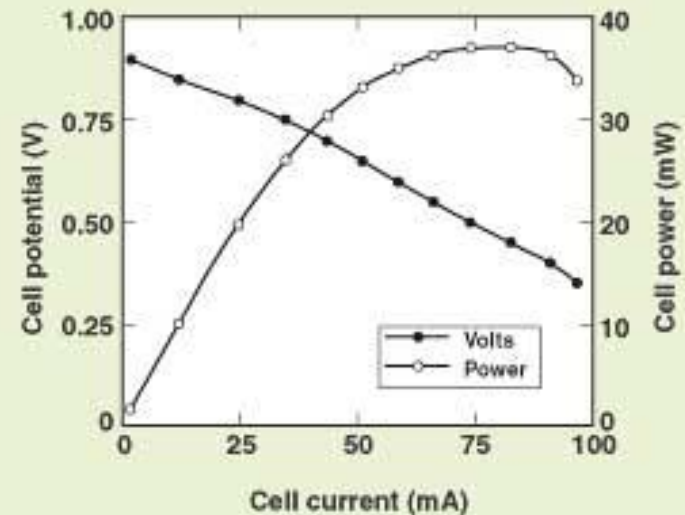
Mikrobaterie

- Micro Fuel Cell
 - J. Morse, LLNL



Thin Film Fuel Cell Operating Conditions

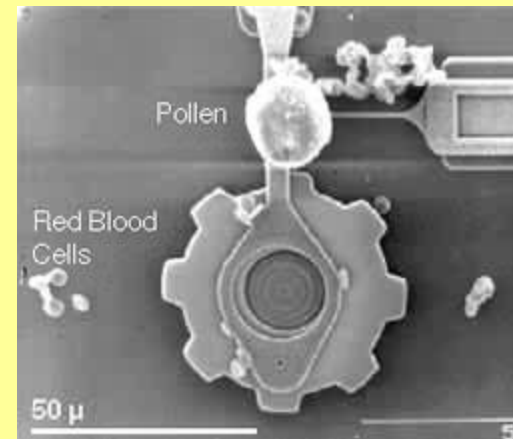
- 4% dilute H₂ fuel, 4 sccm flow
- Temperature 40°C (ambient)
- Air Breathing Cathode
- Catalyst: 2.5 mg/cm² Pt-Cathode
0.4 mg/cm² Pt: Ru-Anode



Lawrence Livermore
National Laboratories

Mikroinżynieria

- Micro gears
- Micro embossing and stamping
- Microactuators (Tiny Motors)
- Micro-valves



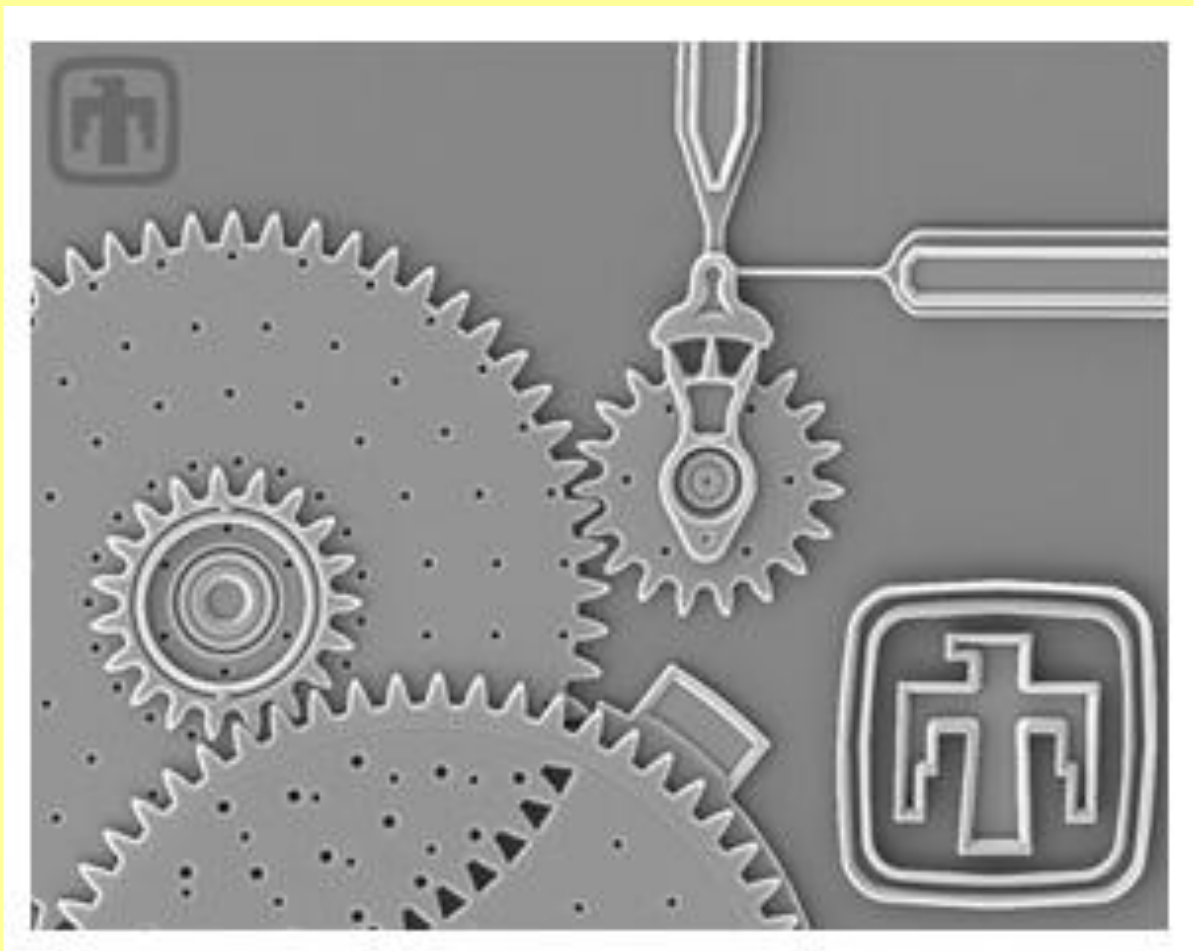
Complex Ratchet

http://www.memx.com/image_gallery.htm



Micro-valves

przekładnia



Potencjał wykorzystania MEMS dla redukcji zużycia energii z nieodnawialnych źródeł

Przetwarzane rodzaje energii	Urządzenie	Zastosowanie
Elektryczna → świetlna	Diody świecące	Oświetlenie
Świetlna → elektryczna	Ogniwo fotoelektryczne	Wytwarzanie energii elektrycznej
Elektryczna → ciepła (chłodzenie)	Chłodziarka termoelektryczna (wykorzystująca efekt Peltiera)	Chłodnictwo
Ciepła → elektryczna	Termoelektryczny generator prądu (wykorzystujący efekt Seebecka)	Odzysk ciepła odpadowego (silników samochodowych)
Chemiczna → elektryczna	Wysokotemperaturowe ogniwo paliwowe	Wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem H_2 (CH_4) jako paliwa