

Sensory w Aplikacjach Wbudowanych

**Przegląd nowoczesnych czujników:
cz. gazu, ciśnienia, wilgotności i temperatury**

dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH

(na bazie materiałów dra inż. Wojciech Maziarz)

Wydział IET, Instytut Elektroniki

Kontakt: worek@agh.edu.pl

Czujniki gazu – elektrochemiczne

Przemiany elektrolitu pod wpływem zmieniającego się stężenia gazu.

W trakcie tych przemian elektrony przechodzą z jednej fazy do drugiej fazy, a atomy, które bezpośrednio uczestniczą w tym procesie zmieniają stopień utlenienia.

Przykład:

1. Elektrochemiczny czujnik tlenu – sonda lambda
(zastosowanie w samochodowych układach wydechowych)

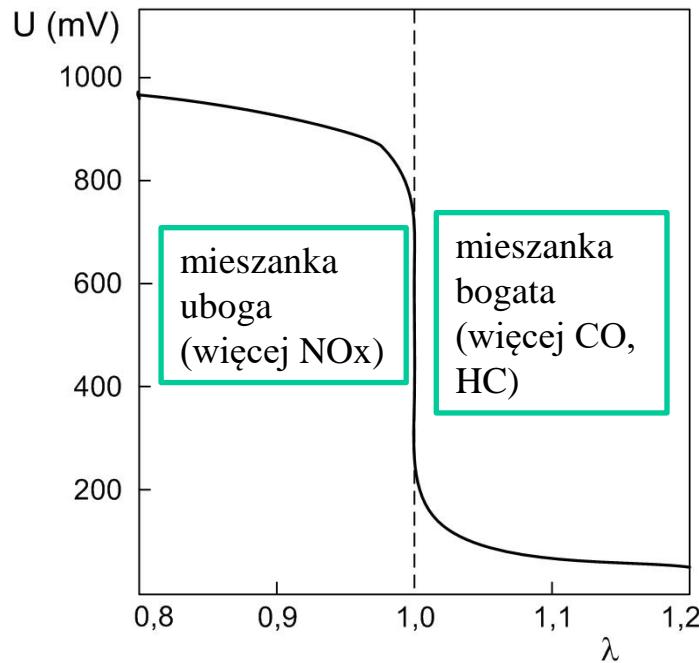


2. Czujnik tlenku węgla Figaro TGS 5042

- idealny do detektorów zasilanych z baterii, ponieważ nie pobiera energii podczas pracy;
- sygnał wyjściowy od 1.2 do 2.4 nA/ppm)
- szybki – 90% wartości ustalonej po 60 s
- wymiar baterii AA



Sensory elektrochemiczne



Charakterystyka sondy lambda w temp. pracy ok. 600°C

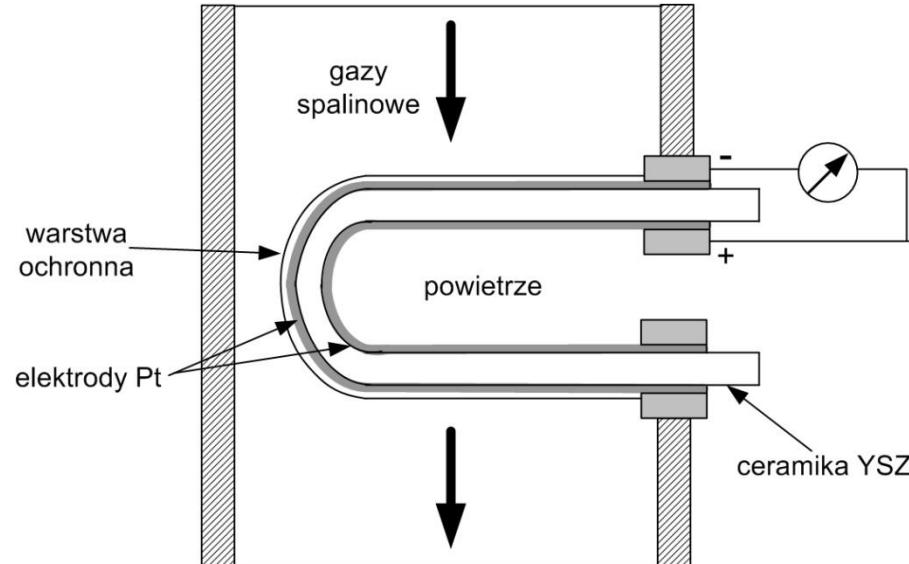
λ - współczynnik nadmiaru powietrza

A - ilość powietrza

F - ilość paliwa

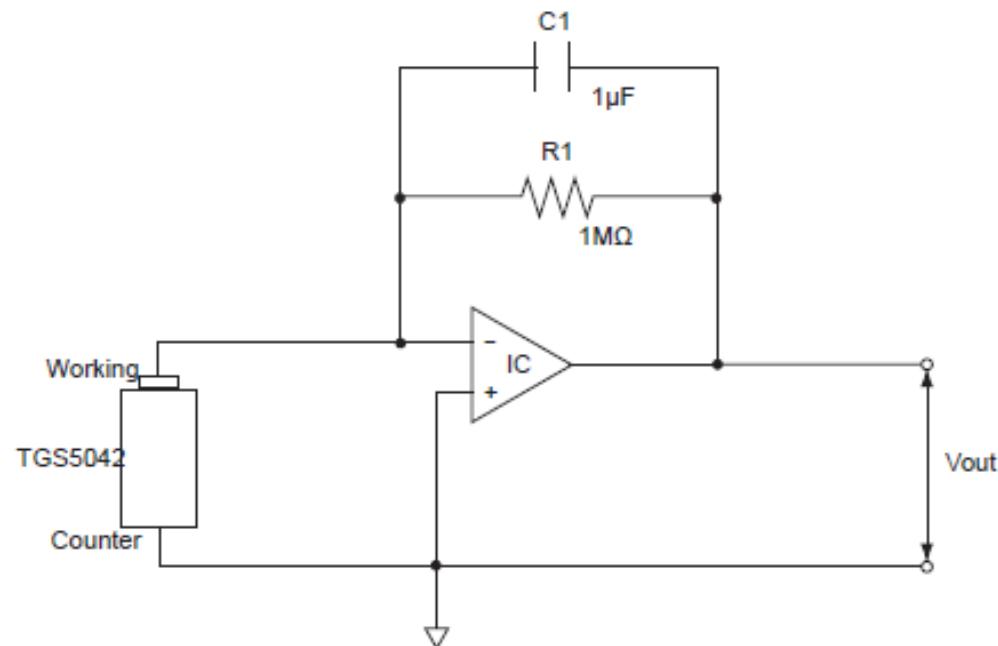
$$\lambda = \frac{A/F}{15}$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5CO}{N_2}}$$



Palcowa tlenowa sonda lambda zainstalowana w rurze wydechowej

Czujniki elektrochemiczne



Basic measuring circuit of TGS5042

Figaro recommends the following electrical parts:

R1 : 1MΩ

C1 : 1μF

IC : AD708 (Ultralow Offset

Voltage Dual Op Amp:

$U_{IOffset} = 5 \text{ uV}$

Drift: 0.1 uV/°C;

LT stability: 0.3 uV/month)

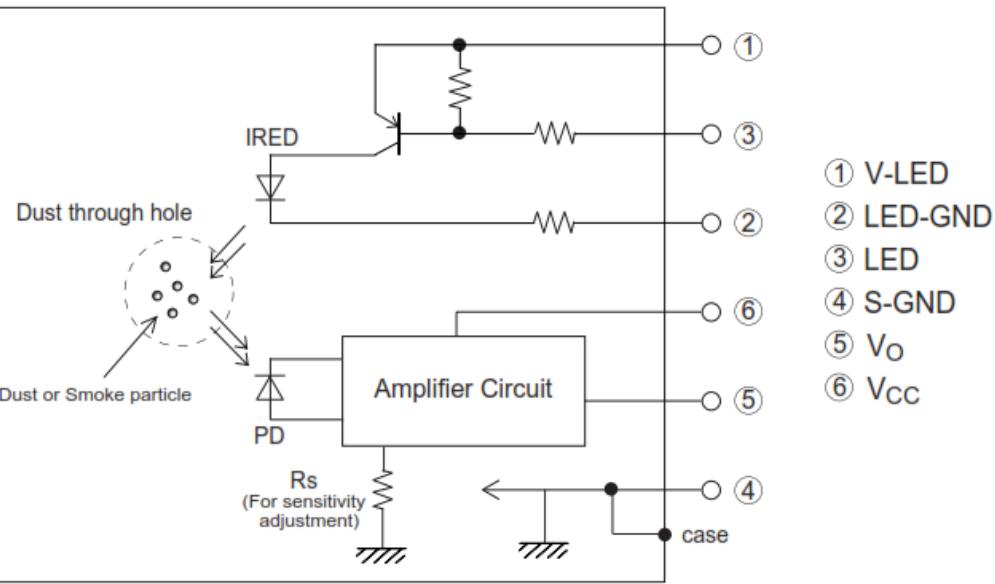
NOTE:

When voltage is applied to the sensor output terminal, the sensor may be damaged.

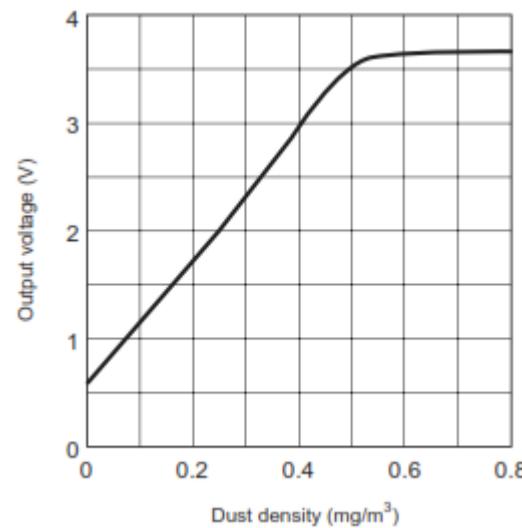
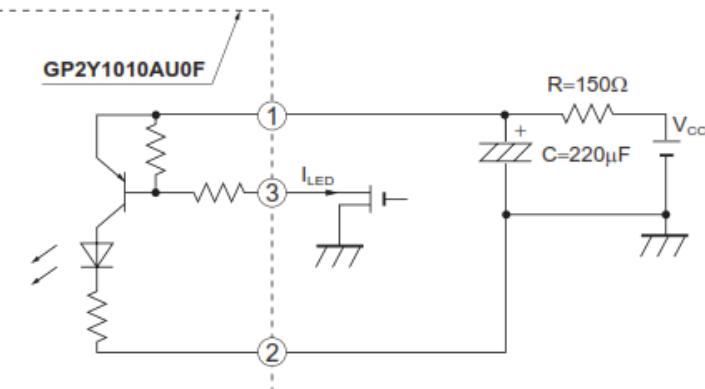
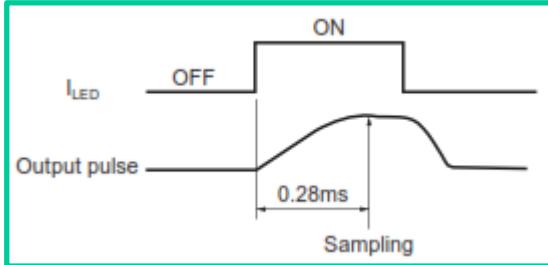
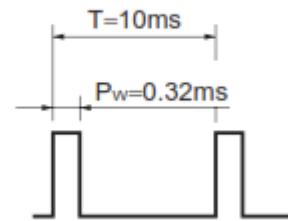
Voltage applied to the sensor should be strictly limited to less than ±10mV.

An additional resistor or FET is required to prevent polarization of the sensor when Vc is off.

Sensory optyczne – czujnik dymu/pyłków - Sharp GP2Y1010AU0F

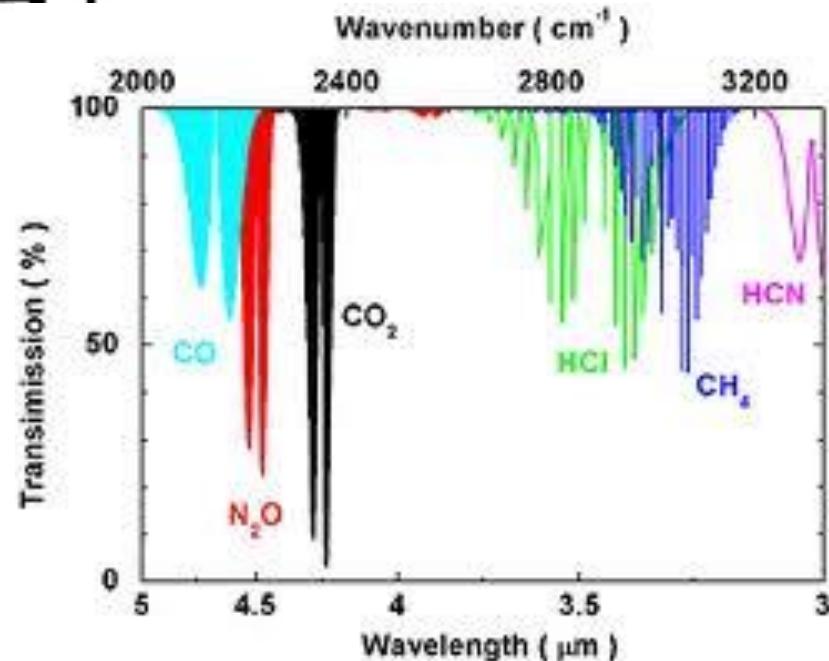
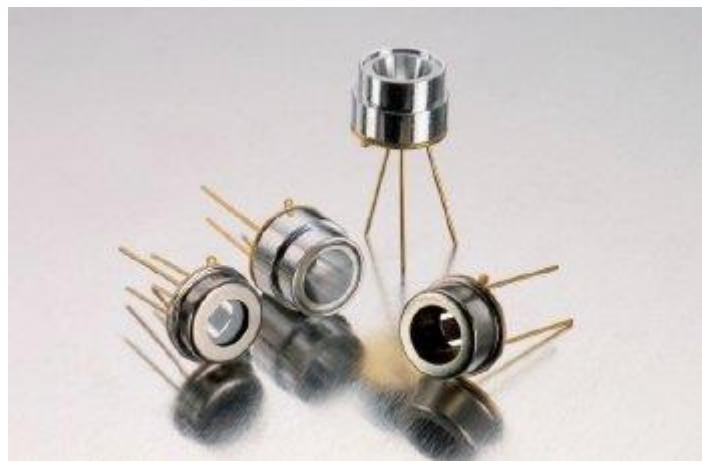
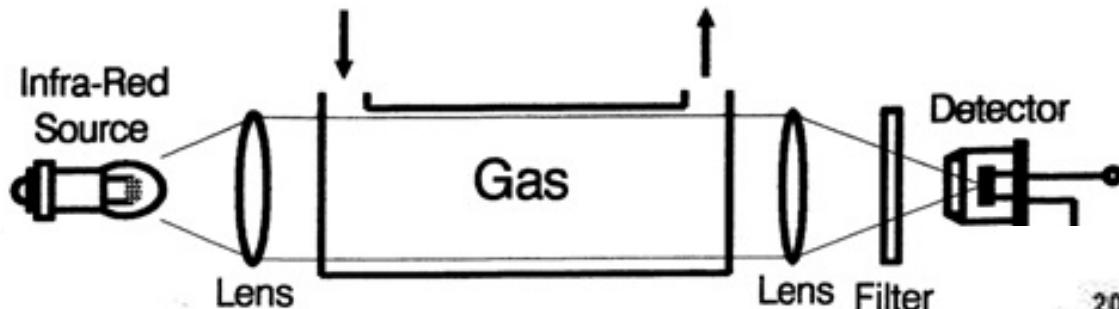


Pulse-driven wave form

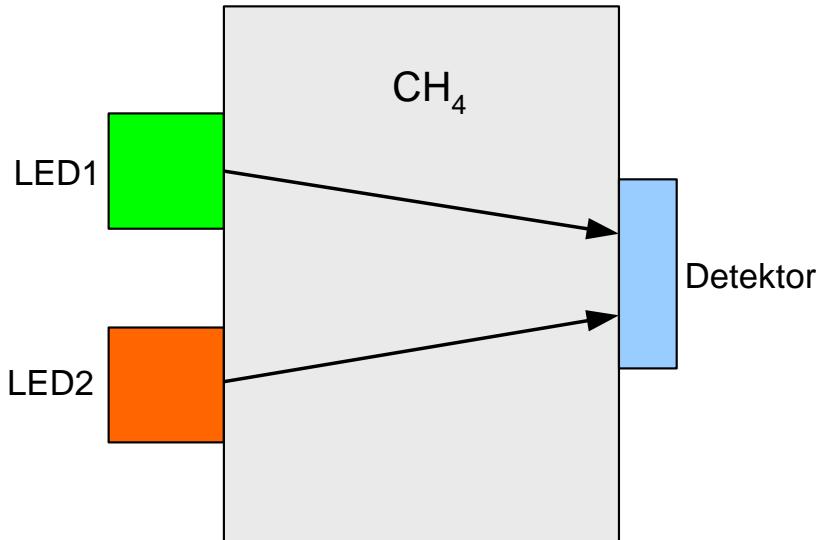


Czujniki gazu – rodzaje

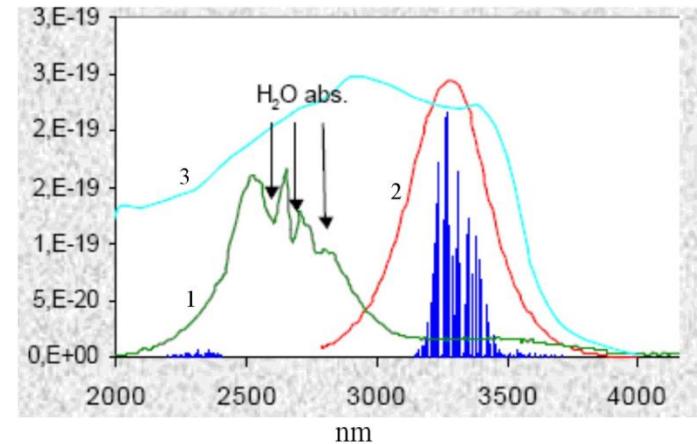
Cz. optyczne, wykorzystujące absorpcję światła o określonej długości fali przez gazy (np. dla gazów z wiązaniem C-H – 3,4 um)



Sensory optyczne

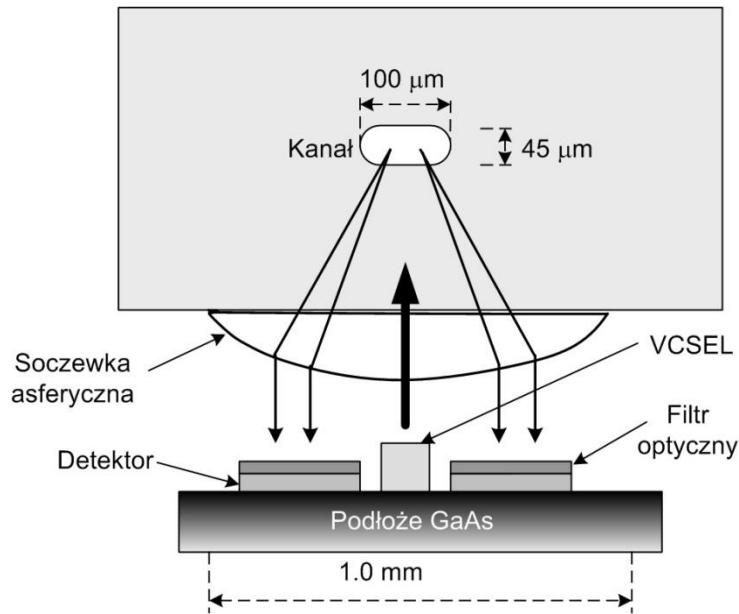


Układ dwudiodowy do pomiaru absorpcji w obszarze NIR

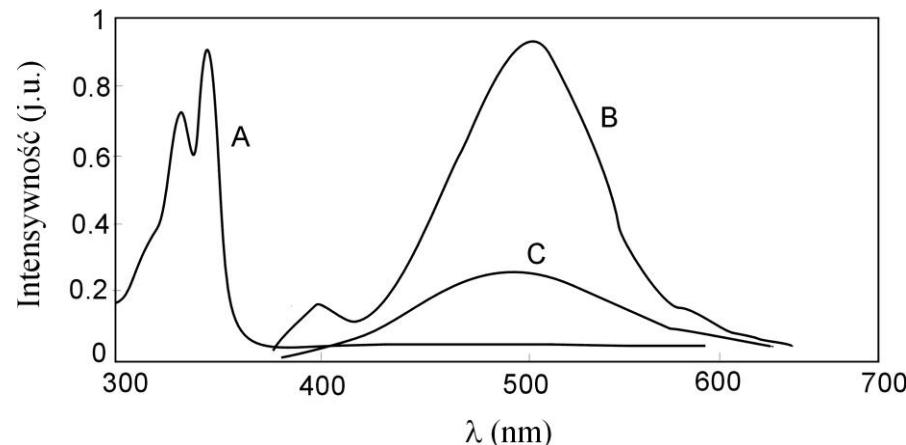


Absorpcja metanu w głównym paśmie 3200 – 3400 nm
1 – dioda LED1,
2 - dioda LED2
3 - detektor

Sensory optyczne



Budowa scalonego sensora fluorescencyjnego
sprzężonego ze strukturą mikrokanalikową
 μ TAS



Widma absorpcji A i emisji
fluorescencyjnej pochodnej
pyrenu (DPB) w atmosferze azotu
B oraz w atmosferze tlenu C

Technical Specifications

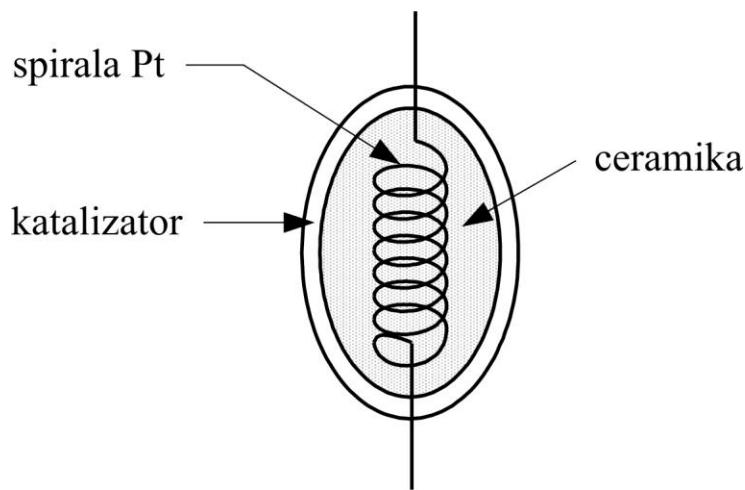
Edinburgh Sensors

Gascard® NG: For CO₂, CO and CH₄

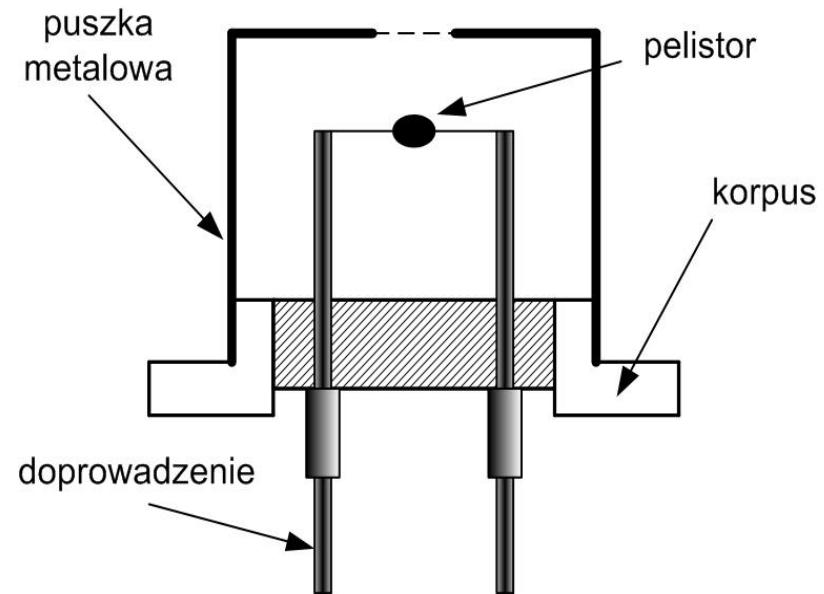
Model*	Gas measurement range		
	CO ₂	CH ₄	CO
Gascard NG	0 – 500ppm**	0 – 5%	0 – 3%
Gascard NG	0 – 1000ppm**	0 – 10%	0 – 10%
Gascard NG	0 – 2000ppm	0 – 30%	0 – 30%
Gascard NG	0 – 3000ppm	0 – 100%	0 – 100%
Gascard NG	0 – 5000ppm	–	–
Gascard NG	0 – 1%	–	–
Gascard NG	0 – 3%	–	–
Gascard NG	0 – 5%	–	–
Gascard NG	0 – 10%	–	–
Gascard NG	0 – 30%	–	–
Gascard NG	0 – 100%	–	–
Accuracy	± 2% of range ±<0.015% of range per mbar*		
Zero stability	± 2% of range (over 12 months)*		
Response time	Bitswitch selectable T ₉₀ = 10 seconds or programmable RC		
Operating temperature	0 – 45°C		
Operating pressure	800 – 1150mbar		
Power requirements	24V DC (7 – 30V)		



Sensory pelistorowe



Pelistor z katalizatorem powierzchniowym
(średnica rzędu 1 mm)



Pelistor zamocowany w obudowie

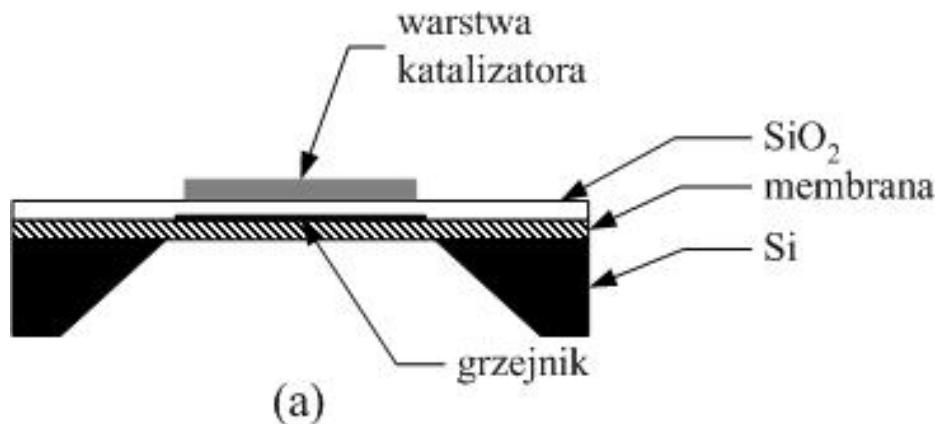
Sensor mikrokatalityczny

Membrana: LPCVD azotek krzemu ($0.5 \mu\text{m}$) wym. $\sim 1 \times 1 \text{ mm}$

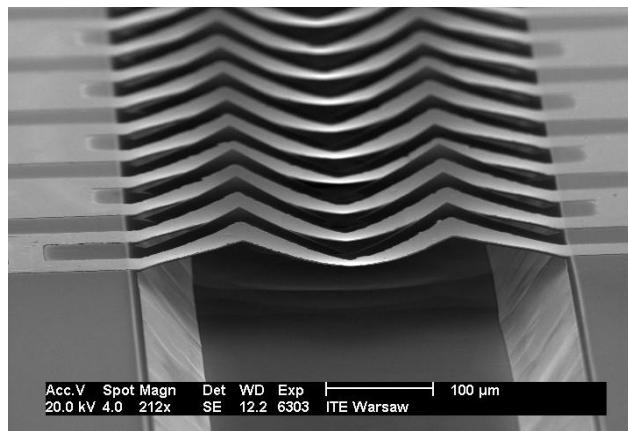
Grzejnik: Pt ($0.3 \mu\text{m}$), kilkadziesiąt Ohm, TWR $> 3000 \text{ ppm/K}$

Katalizator: metal szlachetny (Pd, Rh), grub. \sim mikrometrów
wymiar $\sim 1/3$ wymiaru membrany

Konsumpcja mocy $< 100 \text{ mW}$ dla $T = 500^\circ\text{C}$



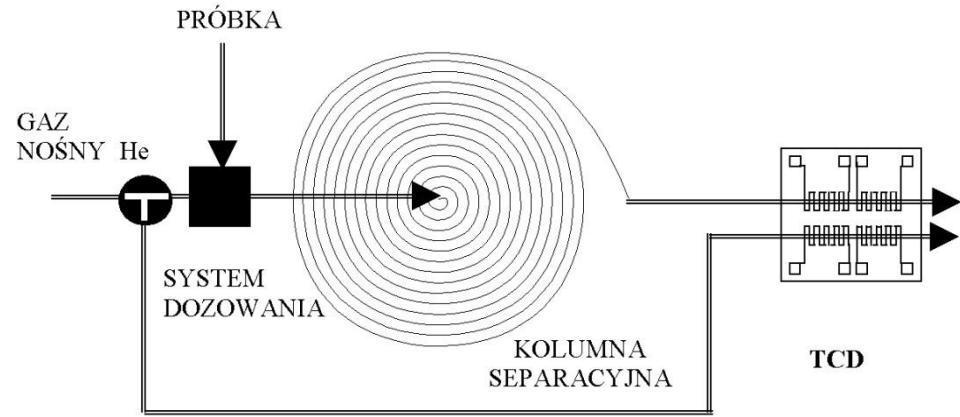
Sensory termokonduktometryczne (katarometry)



Zdjęcie mikroskopowe SEM przedstawiające fragment kanału przepływowego i zawieszonego termorezystora Pt (powiększenie 212 razy)
[J. Łysko – ITE Warszawa]

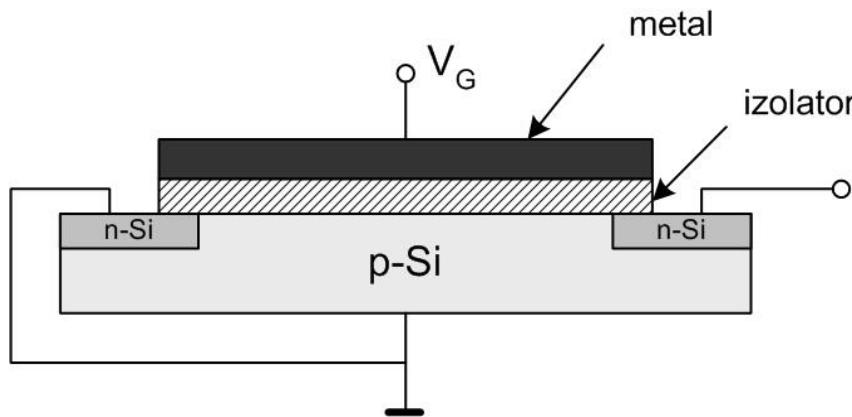
$$\lambda_G \propto \frac{\sqrt{T}}{d_0^2 \sqrt{M_0}}$$

λ_G - przewodność cieplna gazu
 M_0 - masa cząsteczkowa
 d_0 - średnica cząsteczki

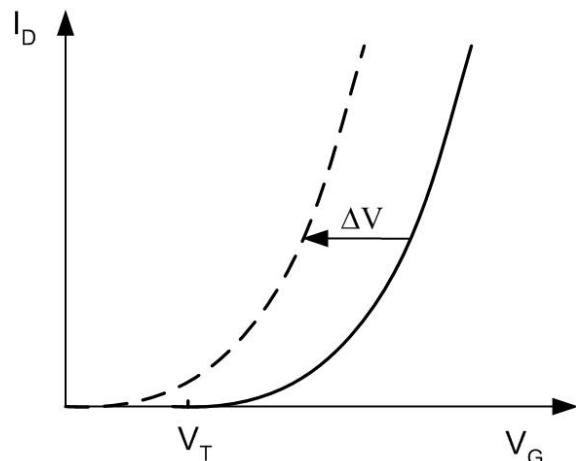


System μ TAS z kolumną separacyjną i detektorem TCD do analizy składu chemicznego mieszaniny gazowej

Struktury z efektem polowym



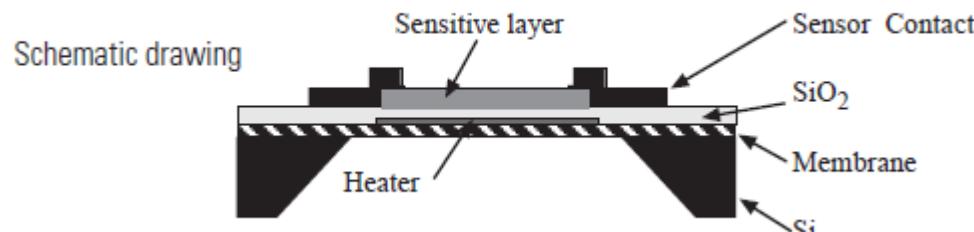
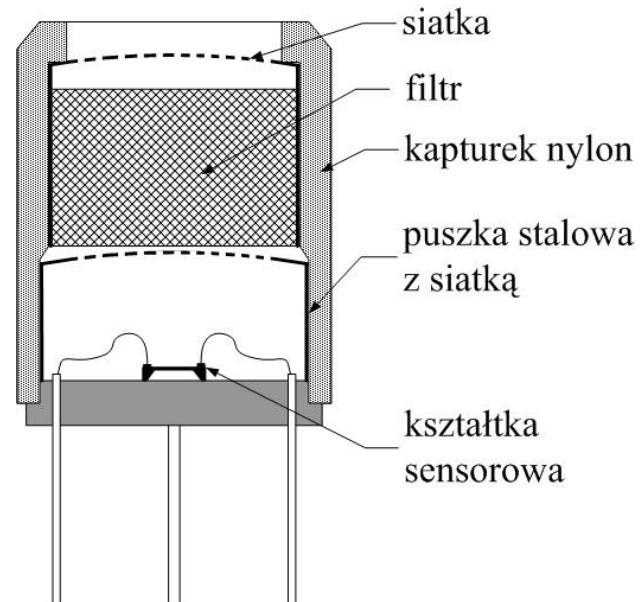
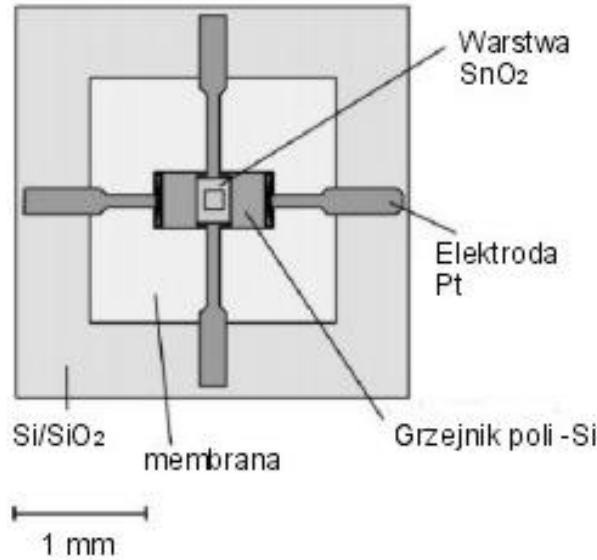
Tranzystor typu MISFET jako
czujnik gazu.
Metal bramki – najczęściej Pd



Zmiana napięcia
progowego tranzystora
polowego w wyniku
oddziaływania z gazem.

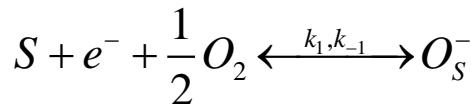
Półprzewodnikowe rezystancyjne czujniki gazu - budowa

Sensor MGS 1100 firmy Motorola do detekcji CO

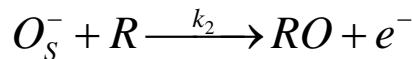


Mechanizm działania sensora rezystancyjnego

Reakcja jonosorpcji
z wychwytem elektronu:



Reakcja redukcji jonu tlenu:

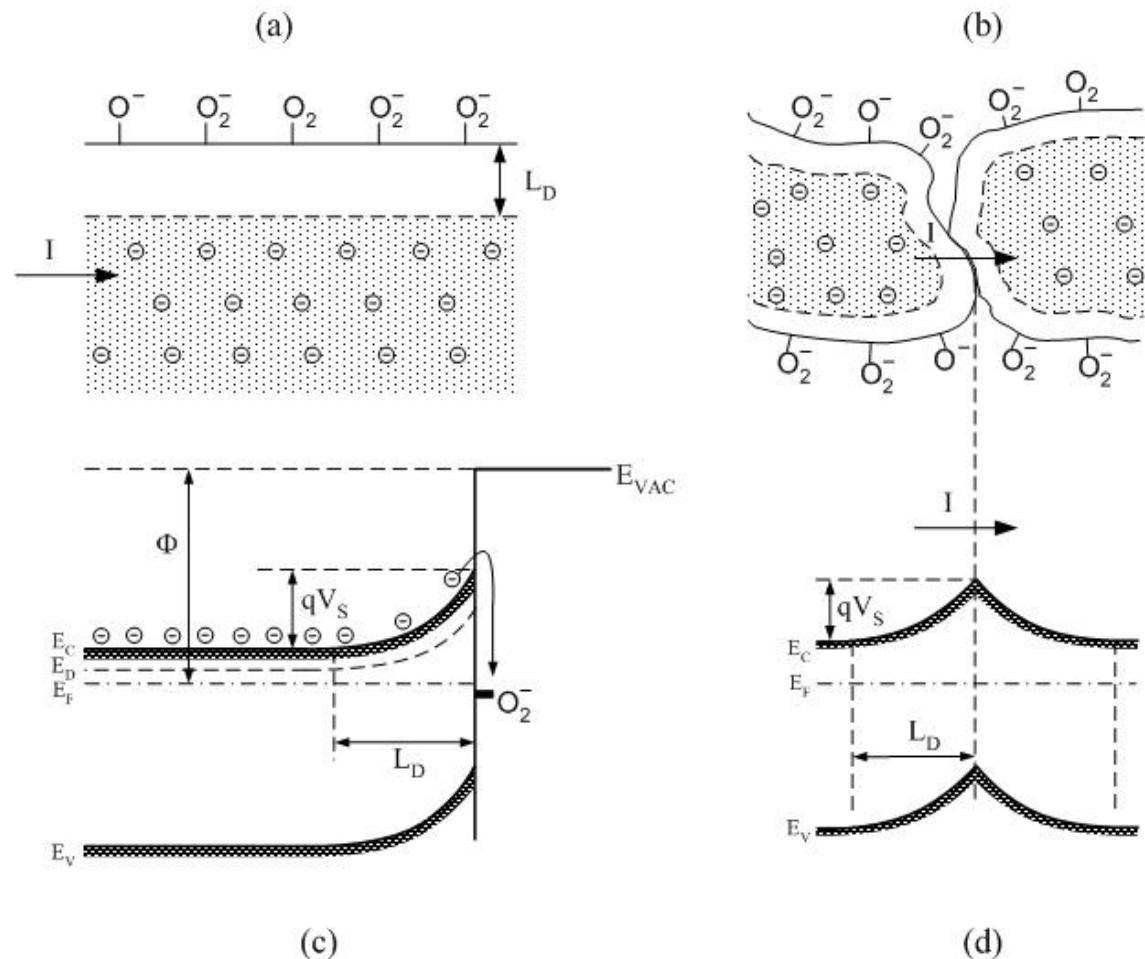


Konduktancja:

$$G = \sigma \frac{WH}{L} \left(1 - \frac{x_0}{H} \right) \quad (\text{a}), (\text{c})$$

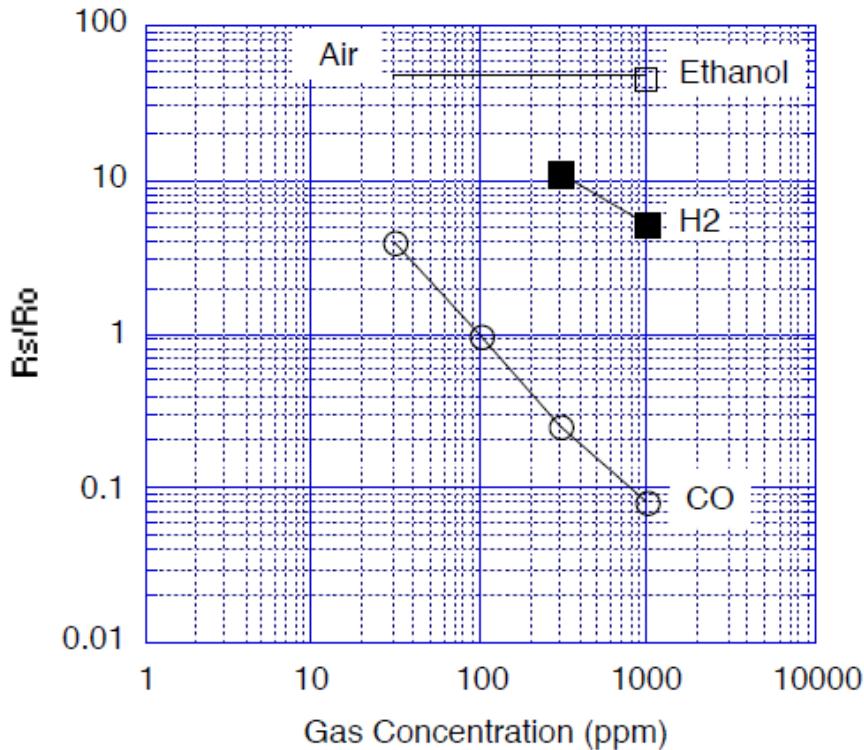
$$G = G_0 \exp\left(-\frac{qV_s}{k_B T}\right) = G_0 \exp\left(-\frac{q^2 N_s^2}{2 \epsilon_0 \epsilon N_D k_B T}\right)$$

(b), (d)

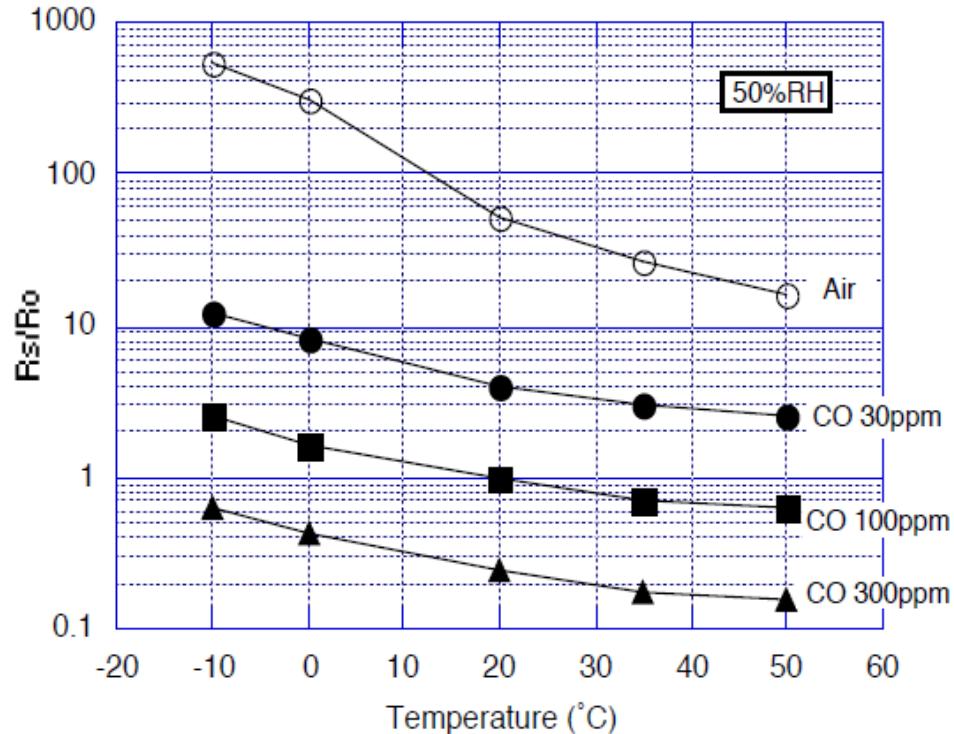


Czujniki gazu - charakterystyki

Sensitivity Characteristics:

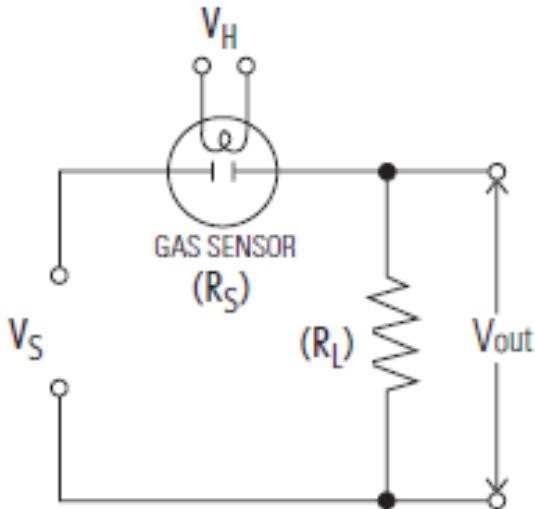


Temperature/Humidity Dependency:

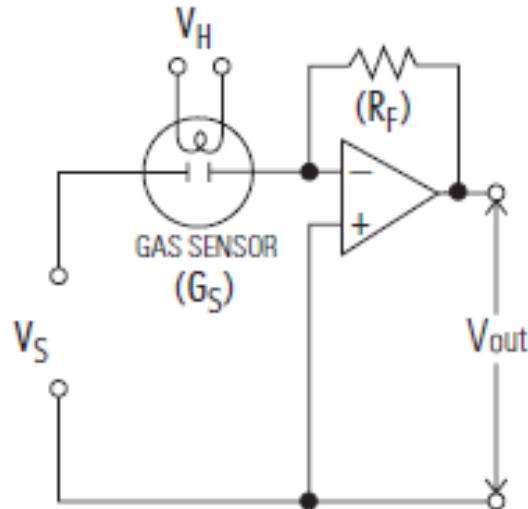


Charakterystyki TGS 2442 firmy Figaro – czujnika tlenku węgla

Czujniki gazu – przykład sterowania 1

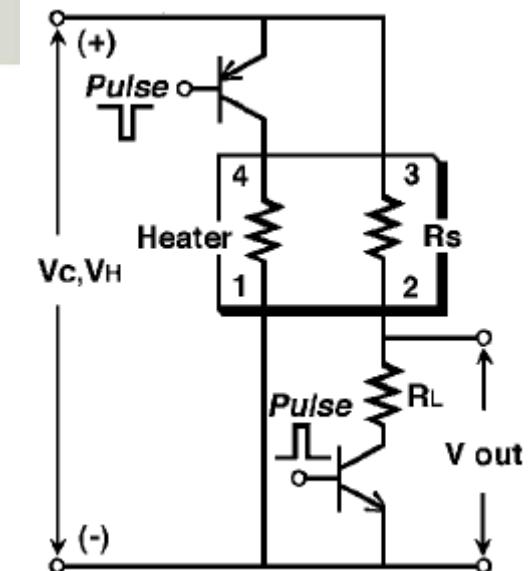


$$R_S = \left(\frac{V_S}{V_{out}} - 1 \right) \cdot (R_L)$$

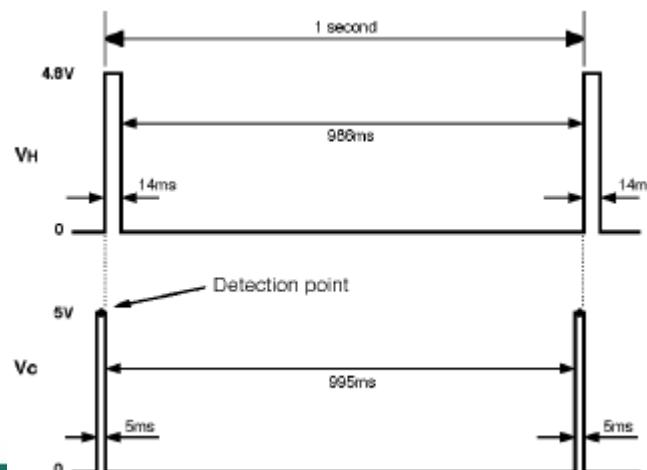


$$G_S = -\frac{1}{V_S \cdot (R_F)} \cdot V_{out}$$

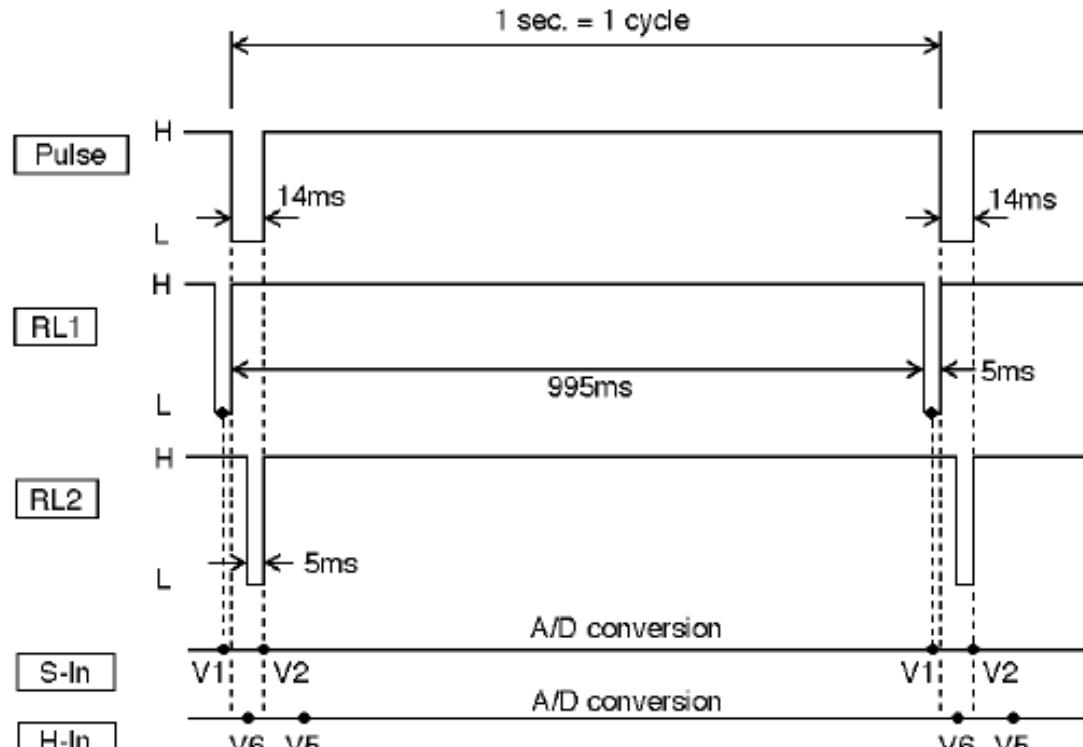
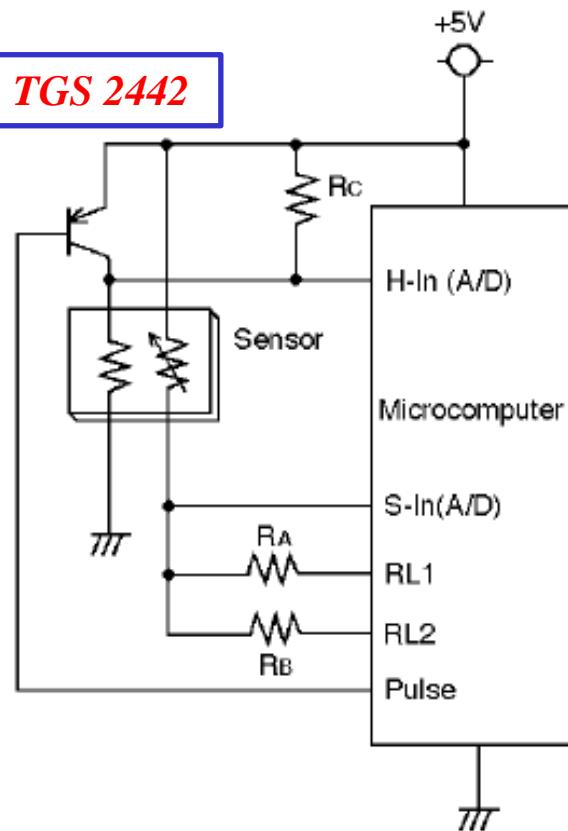
Przykład podpięcia typowego czujnika,
stałe napięcie zasilania grzejnika V_H



Sterowanie impulsowe



Czujniki gazu – przykład sterowania -2



R_A = najbliższa do R_s
 w punkcie kalibracji
 $R_B = 300\text{k}\Omega$, $R_C = 10\text{k}\Omega$

Figure 1 - Basic circuit (*including trouble detection*)

Czujniki gazu – kalibracja i kompensacja temperatury

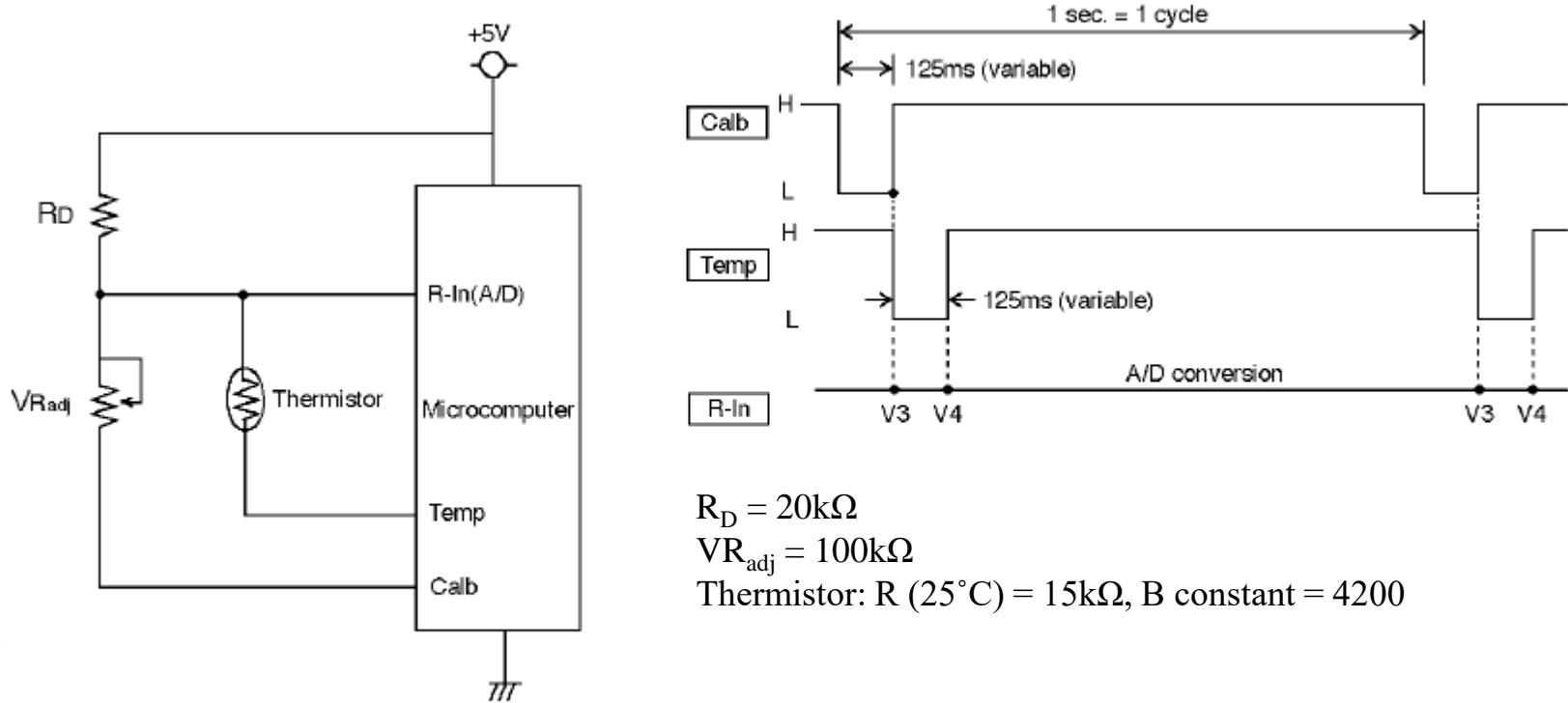


Figure 2 - Calibration & temperature compensation



AGH

Obliczanie stężenia gazu – przykład- 1

Sample V1, V3, V4

- a. Calculation of $f(Rs)$ value
- b. Temperature compensation of $f(Rs)$ value
- c. Compensation for Rs grade variation
- d. Compensation for β grade
- e. Convert to CO concentration output

- a. *Obliczenie Rs : $f(Rs) = (5 - V_1) / V_1$*
- b. *Kompensacja wpływu temp. zewn:*

$$KTemp = Rs/Ro,$$
$$f(Rs^{(1)}) = f(Rs) / KTemp$$

- c. *Kompensacja rozrzutu parametrów egz.:*

$$f(Rref) = (5 - V3) / V3$$

$$f(Rs^{(2)}) = f(Rs^{(1)}) / f(Rref)$$

- d. *Kompensacja rozrzutu nachylenia ch-ki*

$$\alpha = \frac{\log f(Rs^{(2)}) (300\text{ppm}) - \log f(Rs^{(2)}) (100\text{ppm})}{\log 300 - \log 100}$$

- e. *Obliczenie stężenia gazu C:*

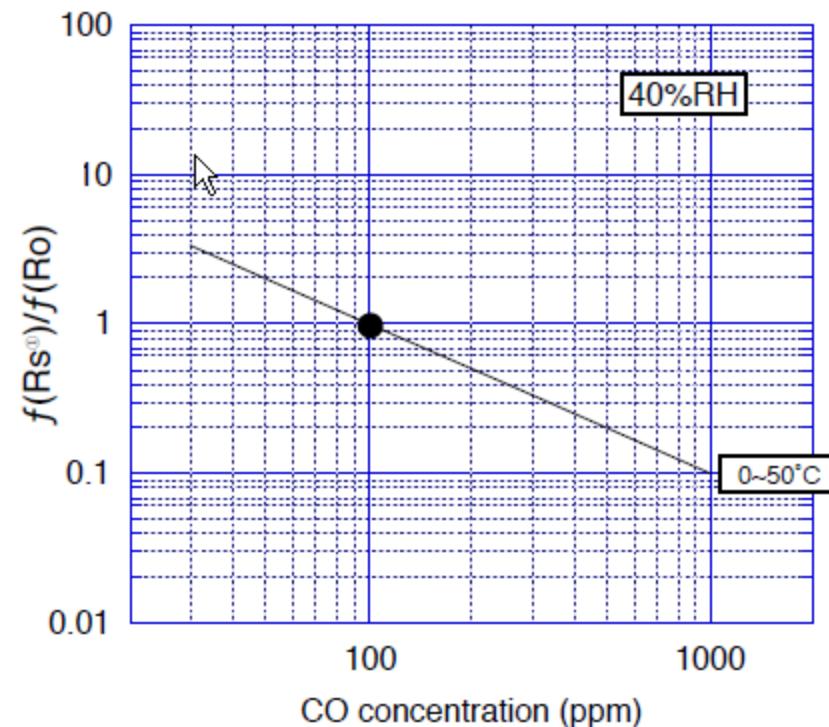
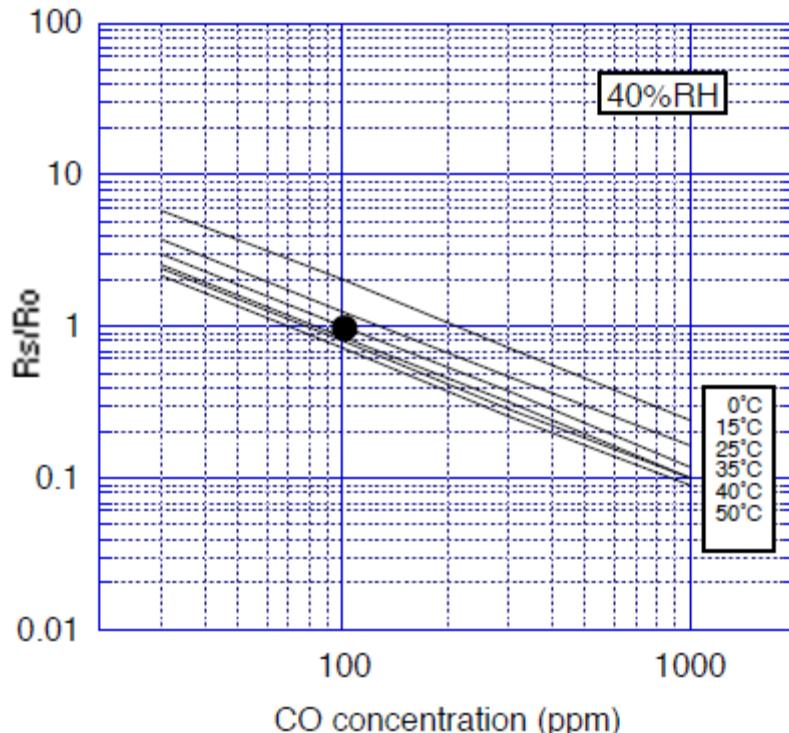
$$C = 100 \times f(Rs^{(2)})^{1/\alpha}$$

V4 Input Value	Temp (°C)	KTemp Coefficient
4.15	-10	2.72
3.92	-5	2.34
3.66	0	1.99
3.37	5	1.70
3.06	10	1.46
2.75	15	1.27
2.44	20	1.12
2.14	25	1.00
1.86	30	0.909
1.61	35	0.839
1.38	40	0.786
1.18	45	0.744
1.01	50	0.712
0.86	55	0.687
0.73	60	0.668

Table 3 - Table of temperature compensation coefficients

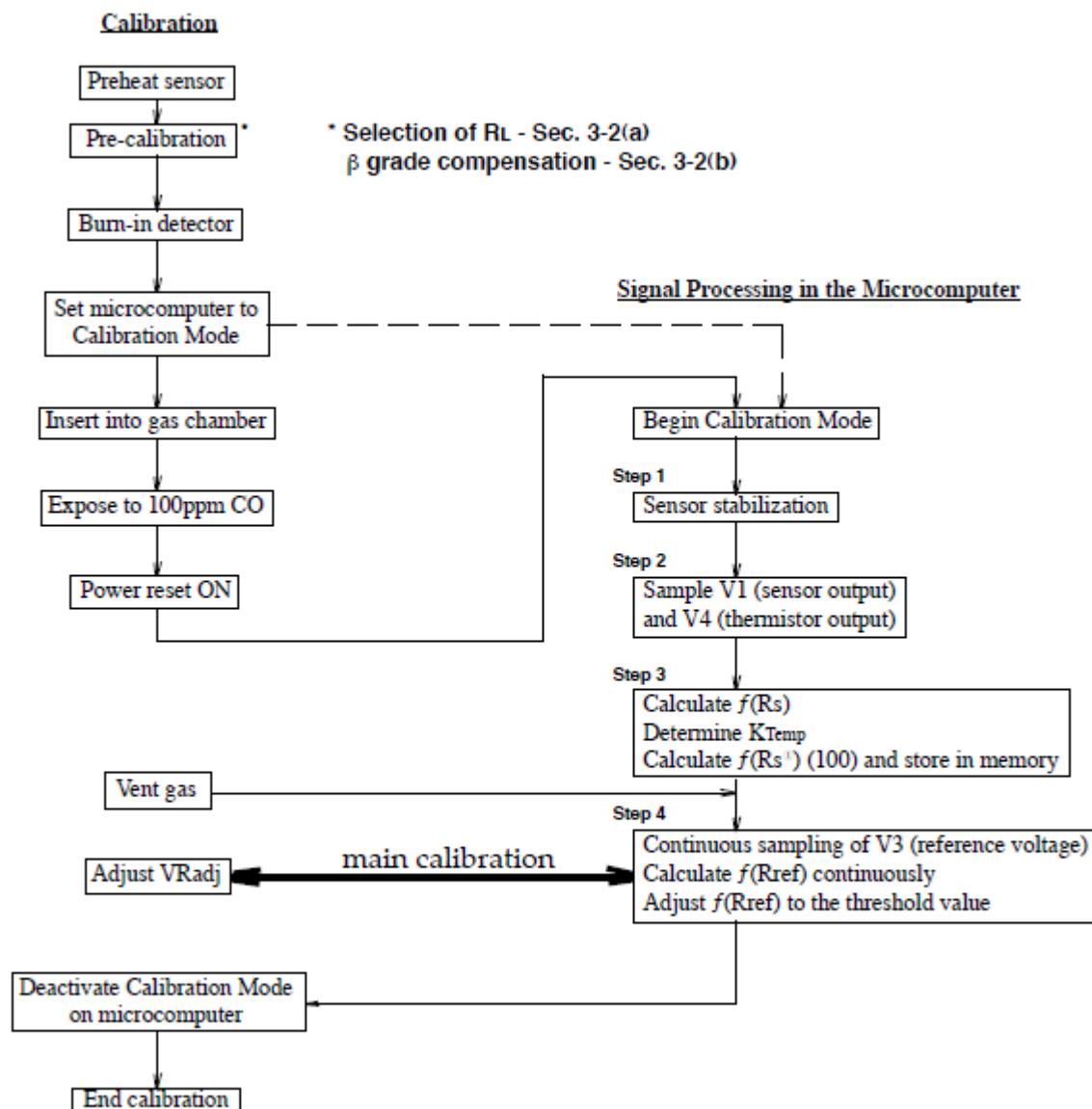
Obliczanie stężenia gazu – przykład- 2

AGH

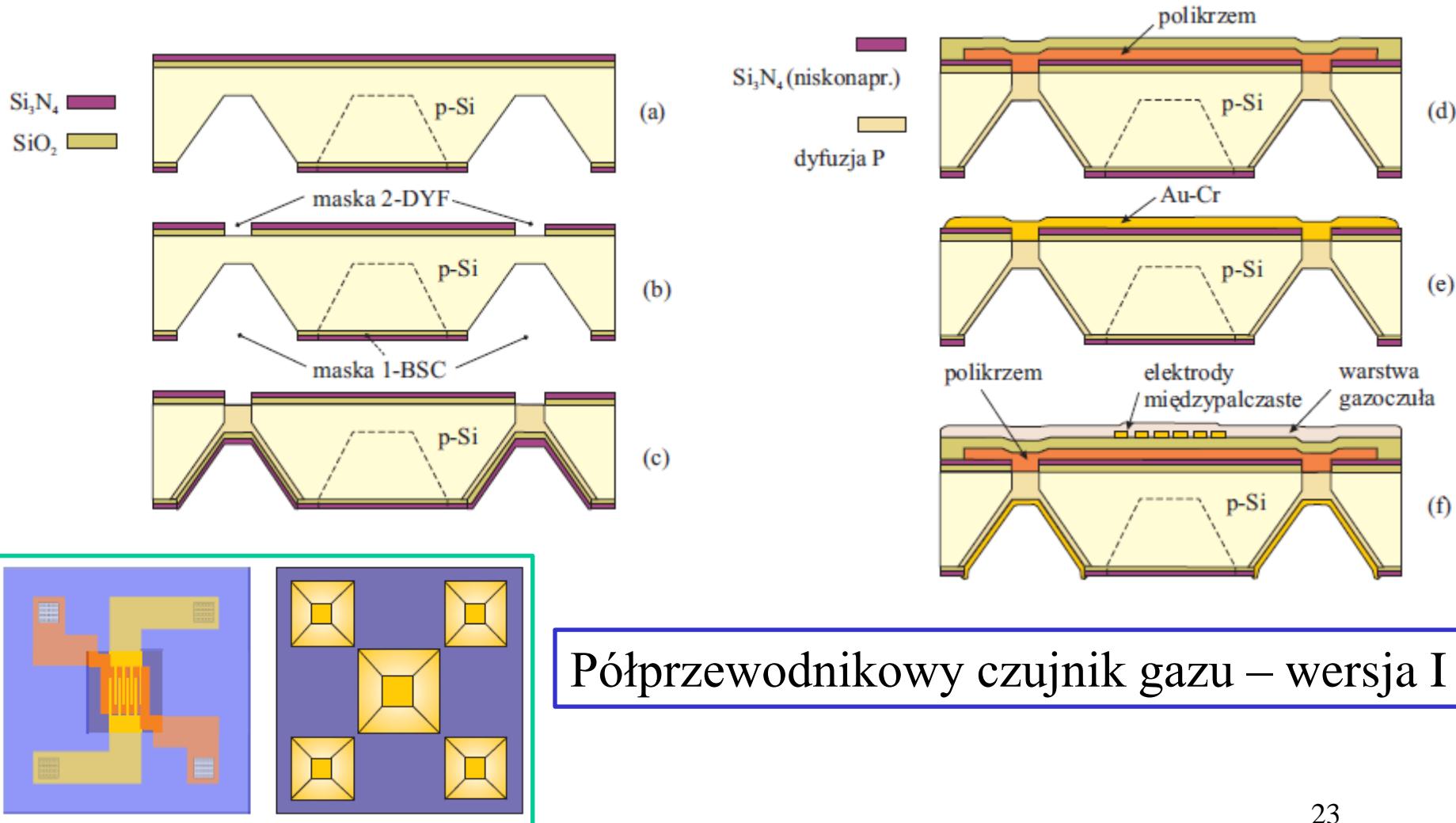


Przed i po kompensacji wpływu temp. zewnętrznej

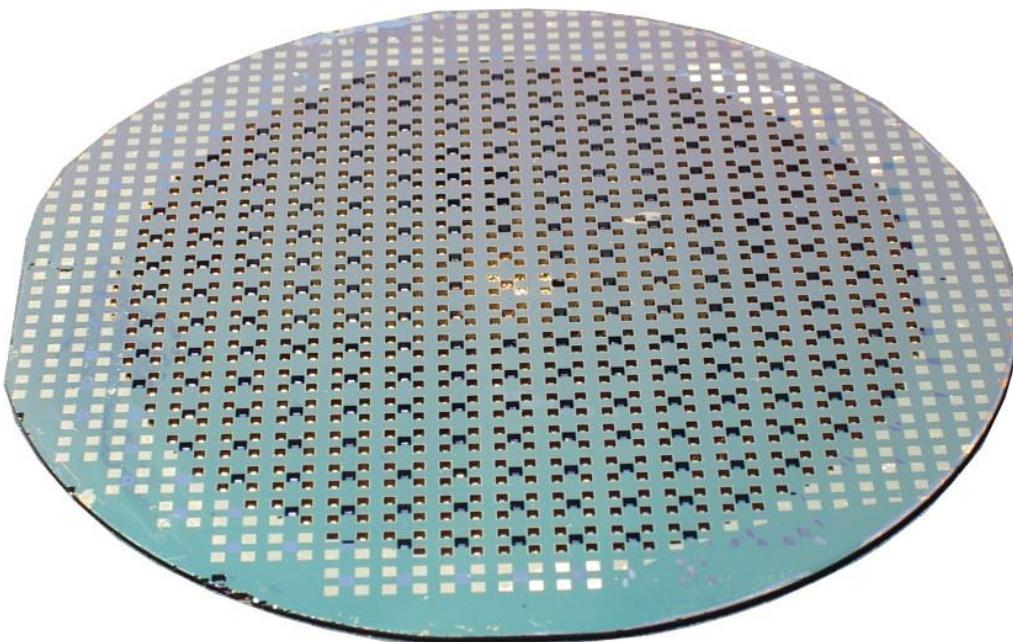
Obliczanie stężenia gazu – przykład- 3



Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych



Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

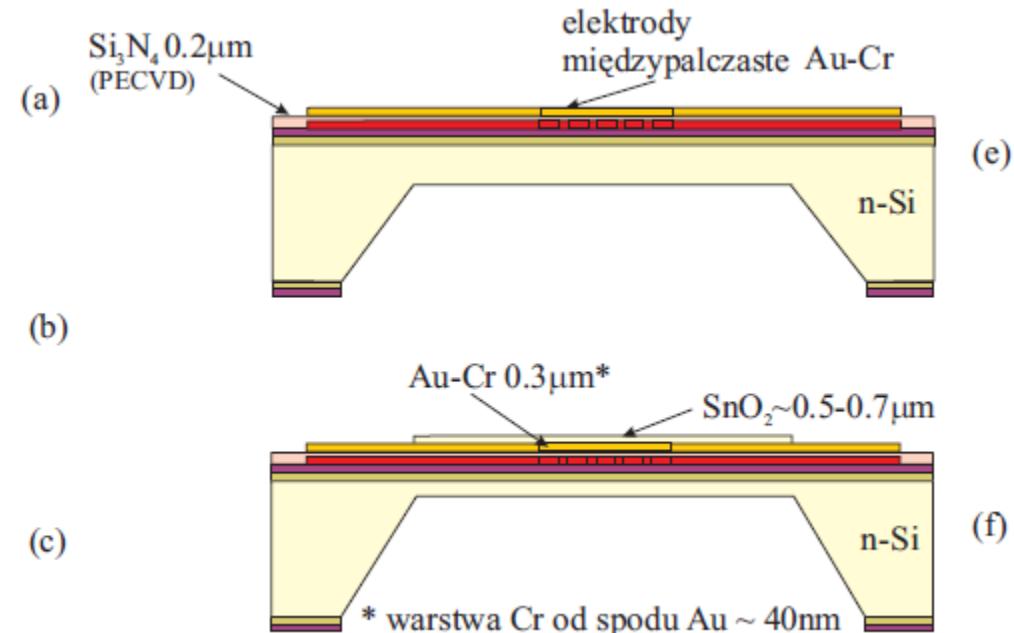
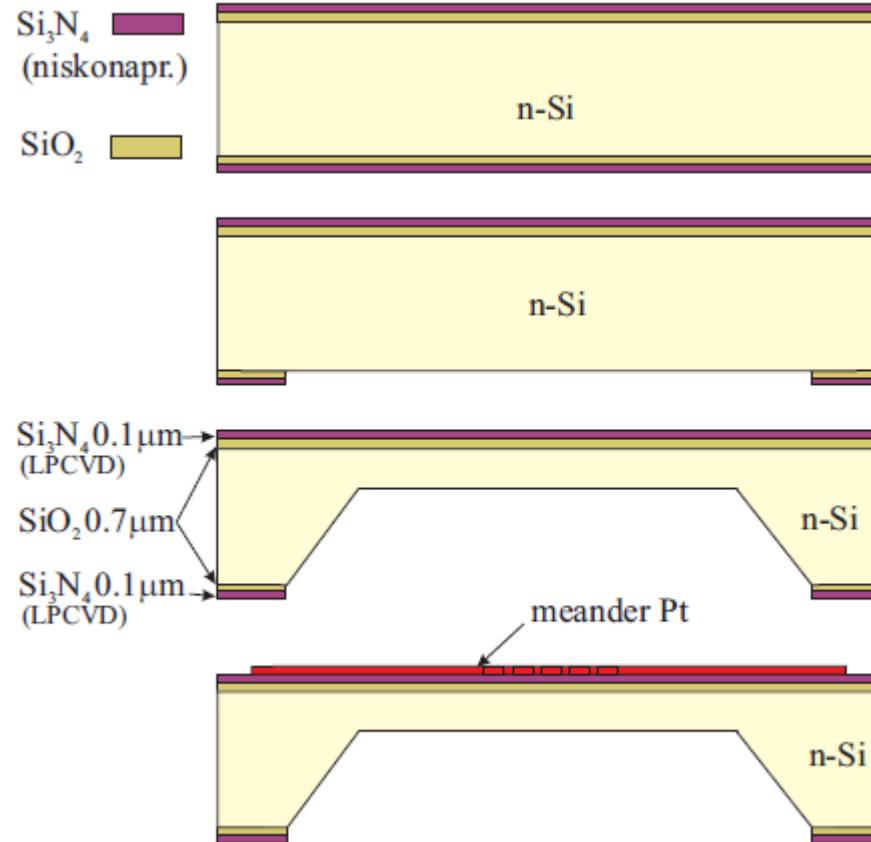


Podłoża czujników gazu
– płytka Si przed wycięciem struktur

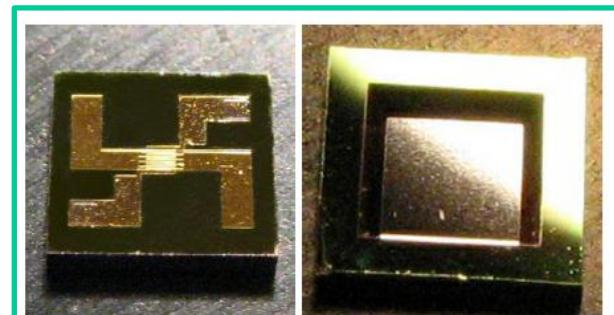


Sensor gazu w obudowie TO-5

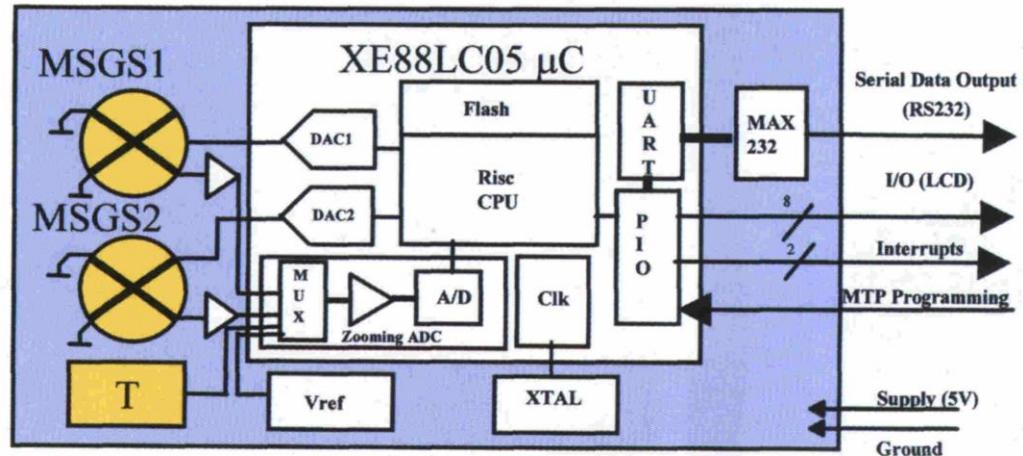
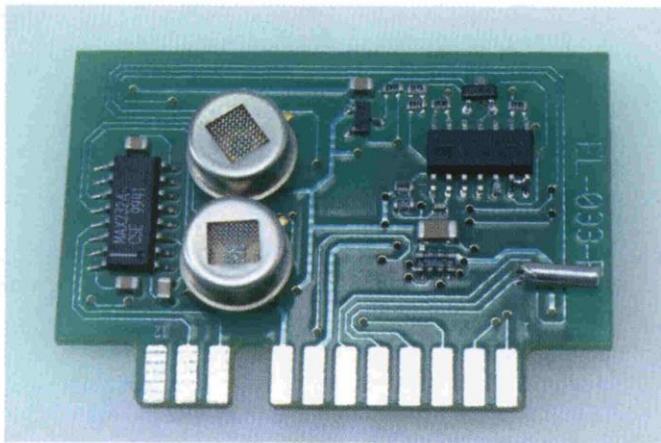
Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych



Wytwarzanie półprzewodnikowego czujnika gazu – wersja III

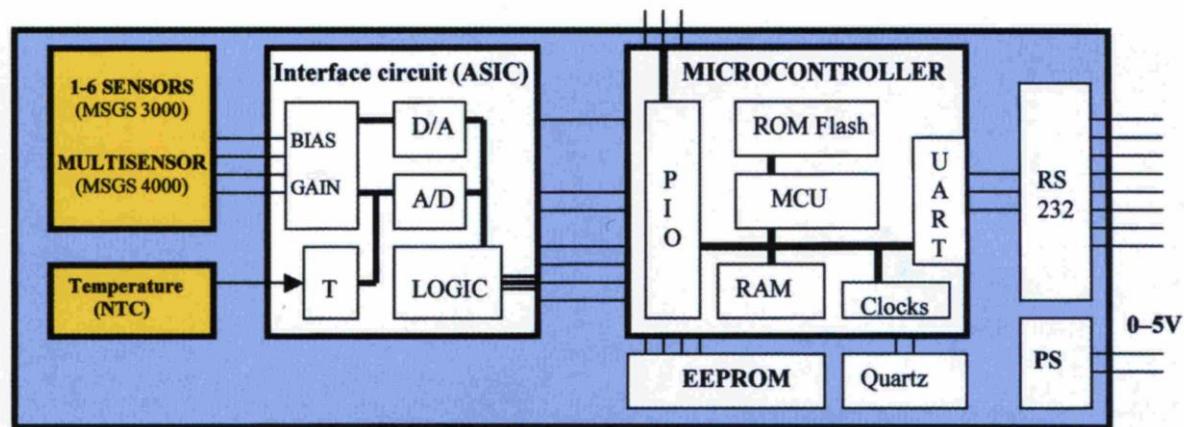
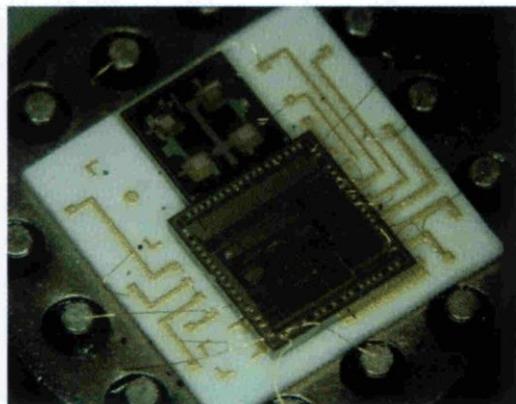


Moduł sensorowy z możliwością programowania



Moduł MSGS 3000 z dwoma sensorami gazu (Microsens)

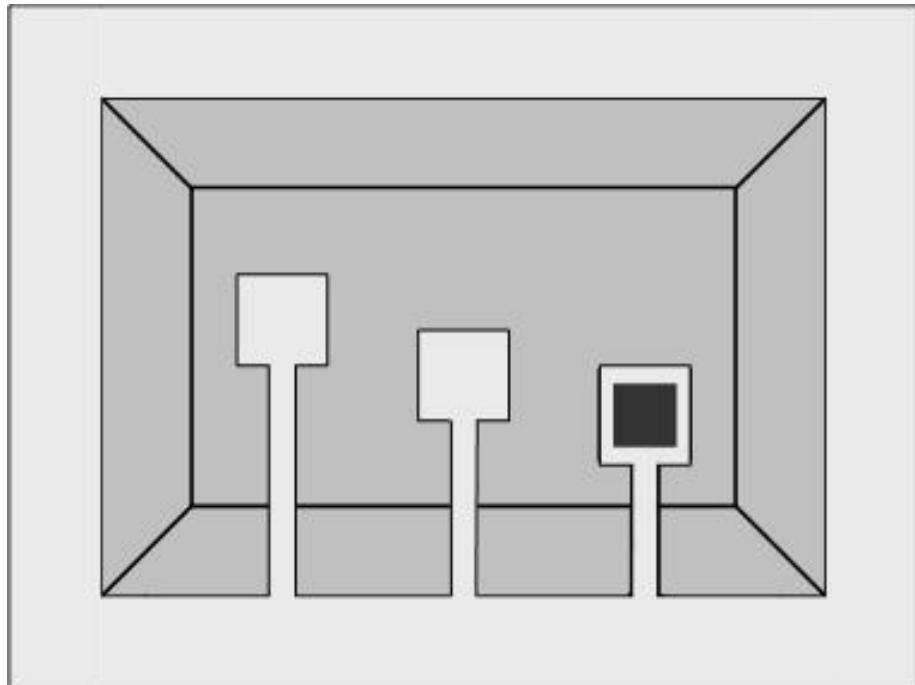
Mikrosystem pomiarowy



MGSM 4000 (Microsens)

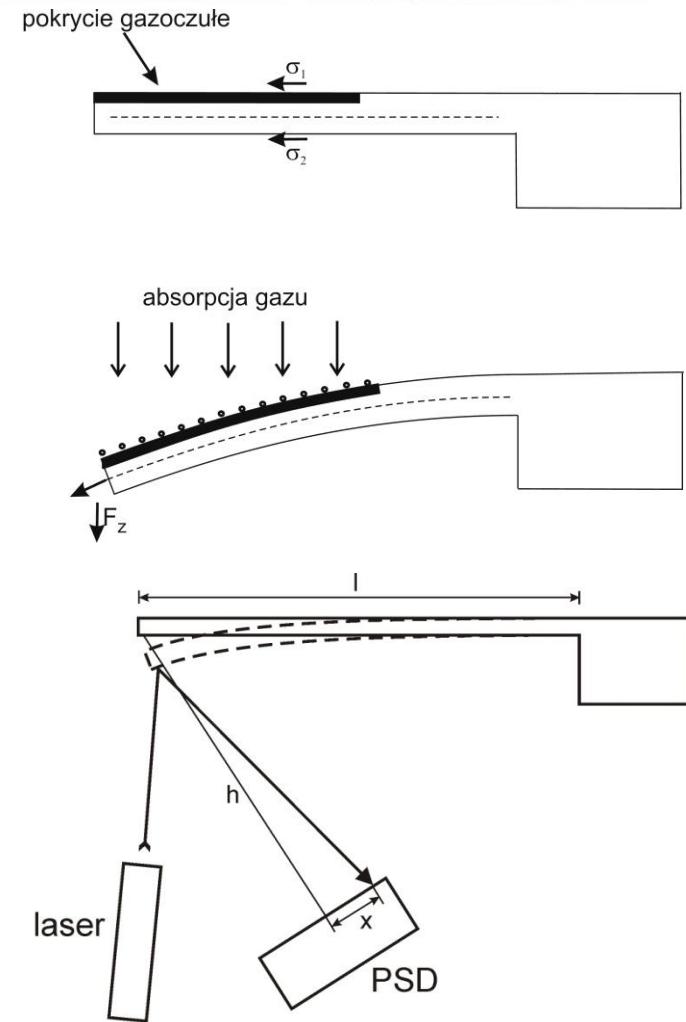
1 – 6 półprzewodnikowych czujników gazu,
dedykowany interfejs (ASIC),
8-bitowy mikrokontroler.

Czujnik gazu wykorzystujący mikrobelki

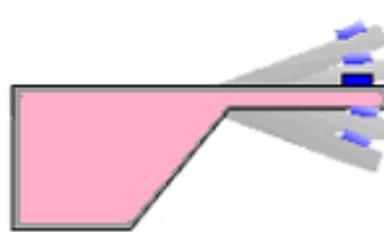


Matryca mikrobelek z zakończeniami,
z których jedno pokryte jest
materiałem gazoczułym.

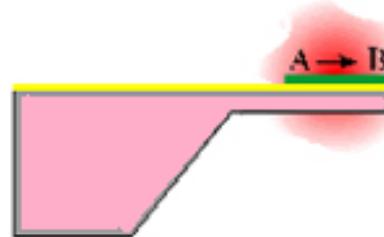
Detekcja częstotliwościowa
(zmiana masy) lub optyczna



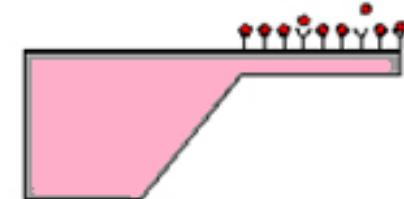
Zastosowania mikrodźwigni



Zmiana masy



Zmiana temperatury



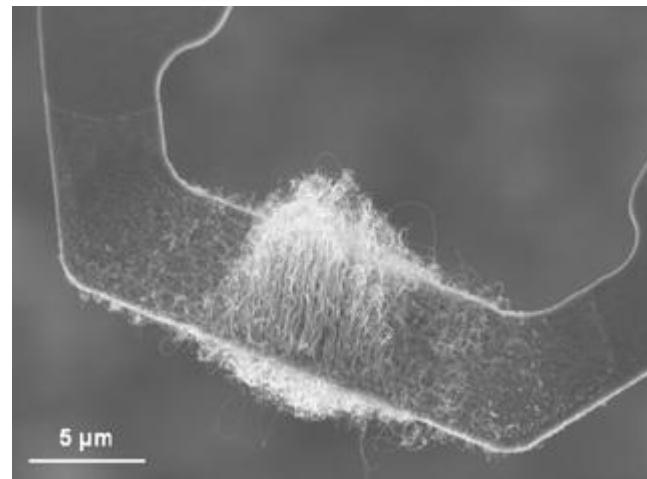
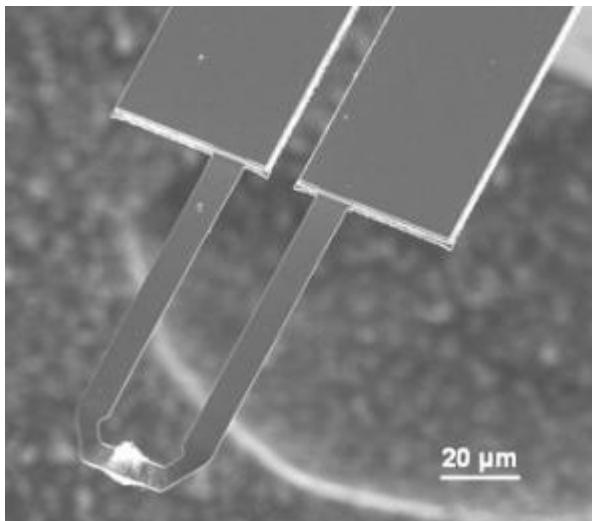
Zmiana napreżeń powierzchniowych

Bardzo czułe wskaźniki zmian substancji biochemicznych (gazów, cieczy, oparów).

Reakcja biochemiczna na mikrobelce może skutkować ugięciem belki, zmianą temperatury lub napreżeń powierzchniowych

Detekcja: zmiana częstotliwości rezonansowej lub kąta odbicia.
Belka pokryta substancją aktywną.

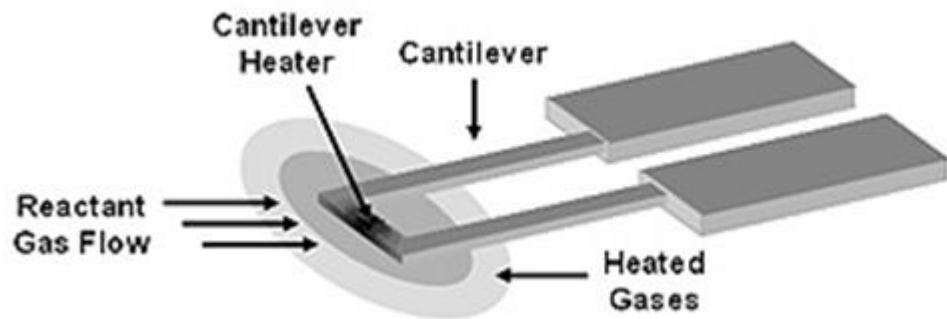
Zastosowania mikrodźwigni – wzrost nanostruktur



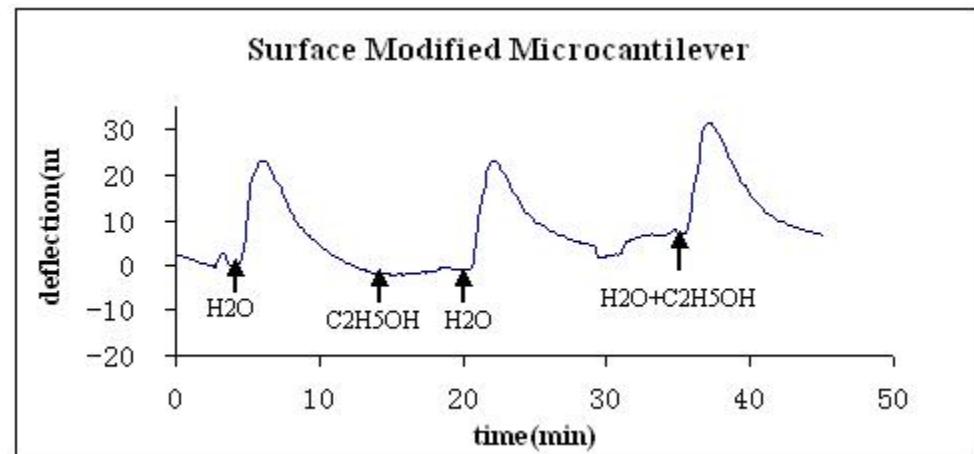
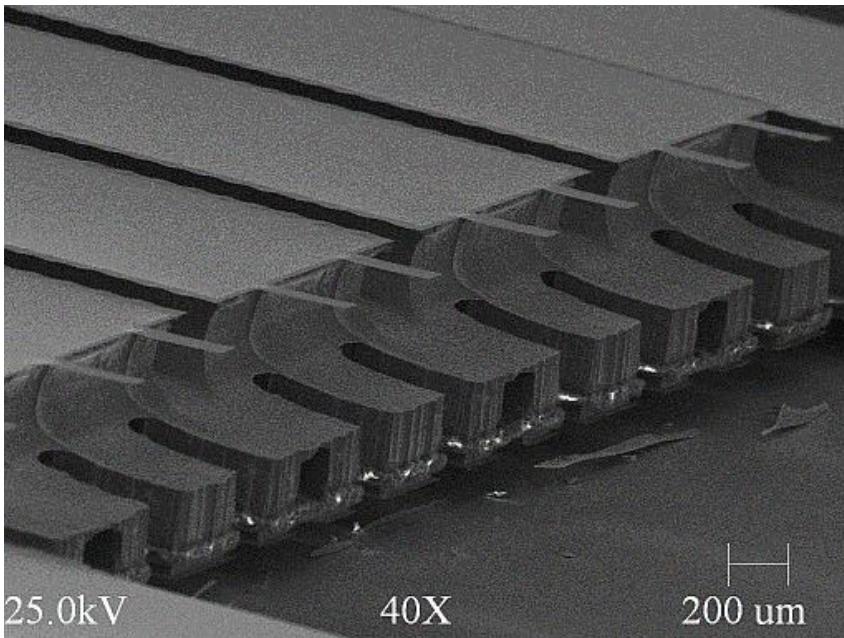
Wzrost CNT na końcu mikrobelki

Zmiana częst. rezonansowej umożliwia wyznaczenie masy osadzonych CNT z dokł. ~4 pg (4×10^{-12} g).

Możliwy wzrost i pomiar wagi CNT w tym samym czasie

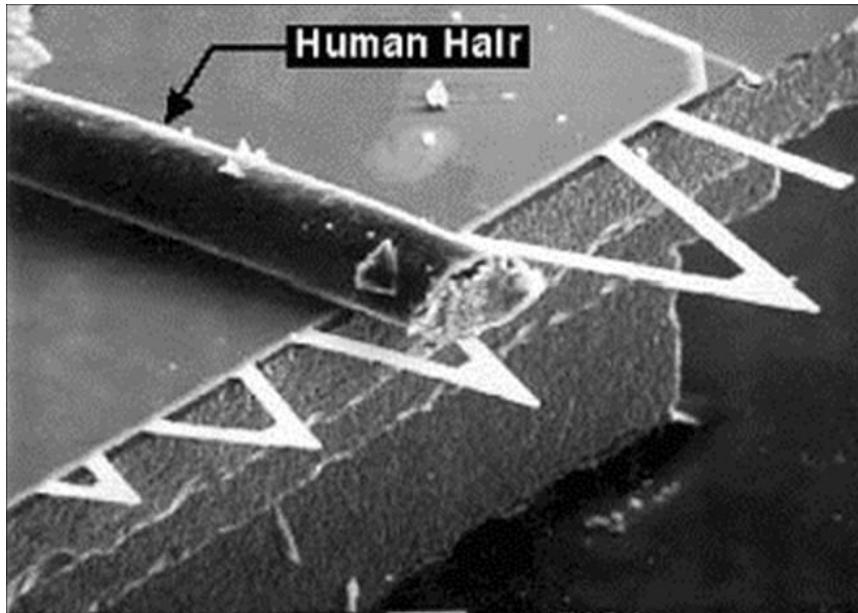


Czujnik wilgotności wykorzystujący mikrobelki



- Mikrobelki SiO_2
- Czułość większa niż dla Si → nieczuły na pary etanolu
- Wytworzone w kombinowanym procesie suchego trawienia izotropoweg o i anizotropoweg o

Czujnik gazów szkodliwych wykorzystujący mikrobelki



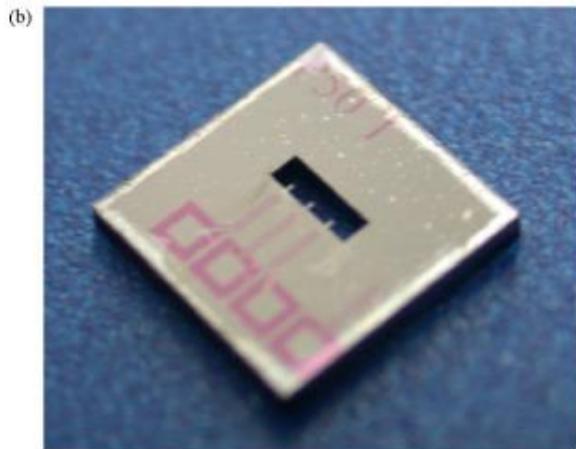
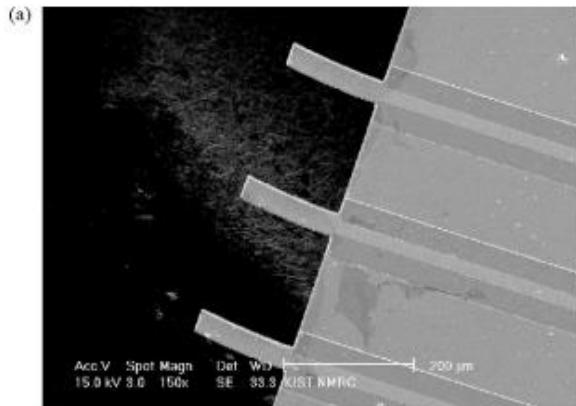
Tanie,
miniaturowe,
bardzo czułe.

Mozliwa detekcja wielu
związków jednocześnie.

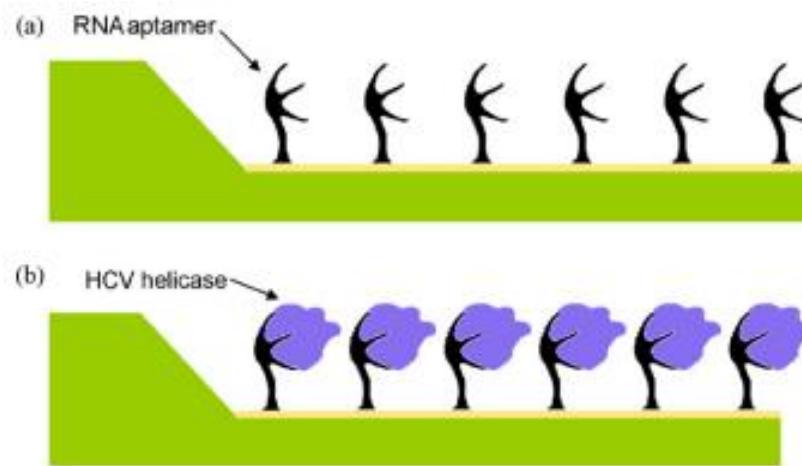
Warstwy gazoczułe:
polimery, enzymy

Detekcja na poziomie ppb

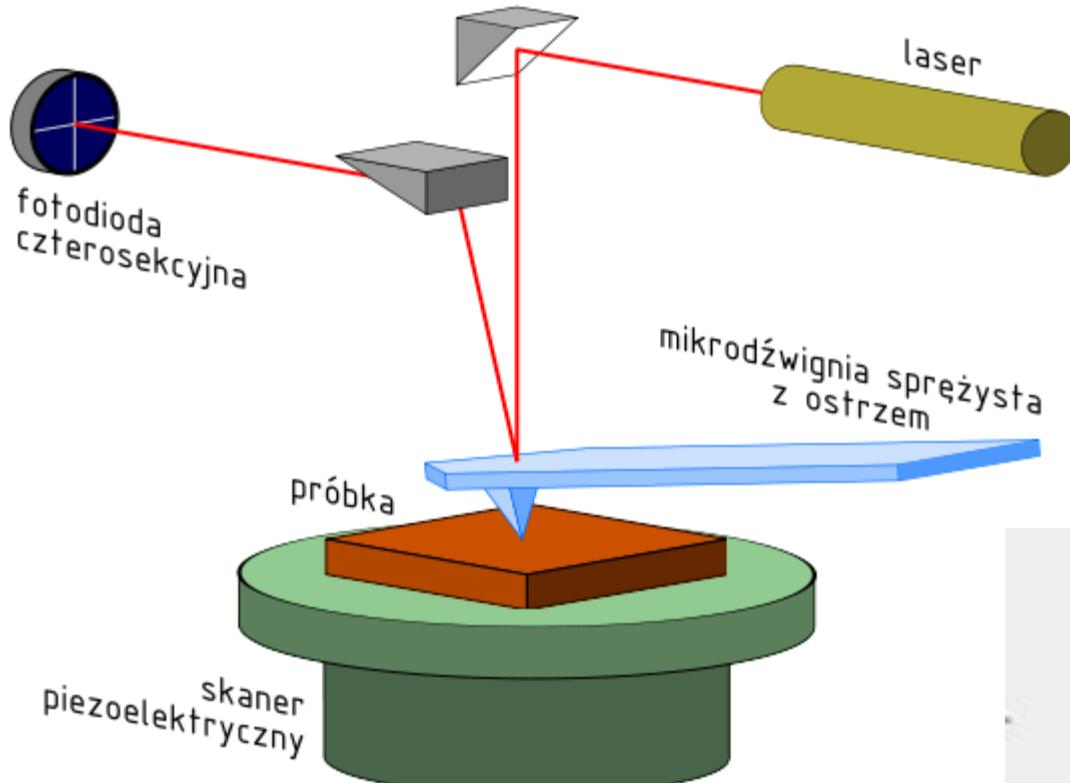
Bioczujnik wykorzystujący mikrobelki



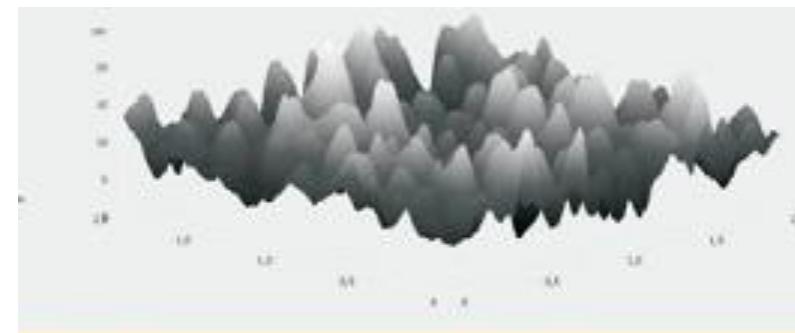
- wykrywanie wirusowego zapalenia wątroby
- mikrobelka 150um x 50um
- pokryta związkiem (receptor molekuł) „wyłapującym” helikazę HCV
- zmiana częst. rezonansowej mikrobelki



Zastosowanie mikrobelek w AFM

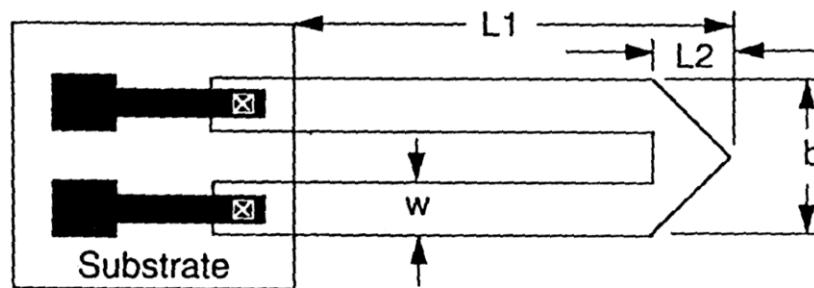
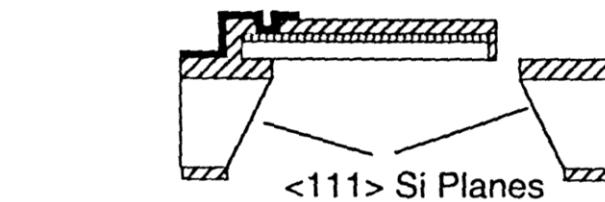
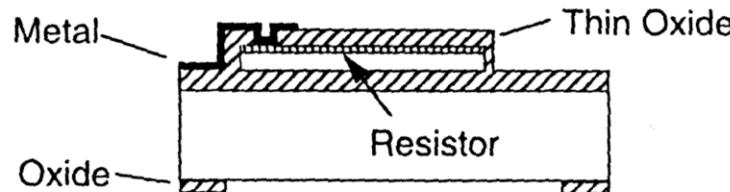
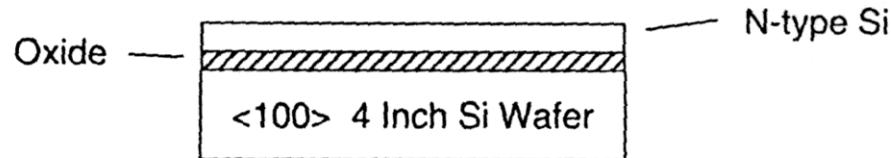


- wykorzystuje siły oddz. międzyatomowych
- Igła przemiata (skanuje) powierzchnię
- Rozdzielcość rzędu pojedynczych atomów



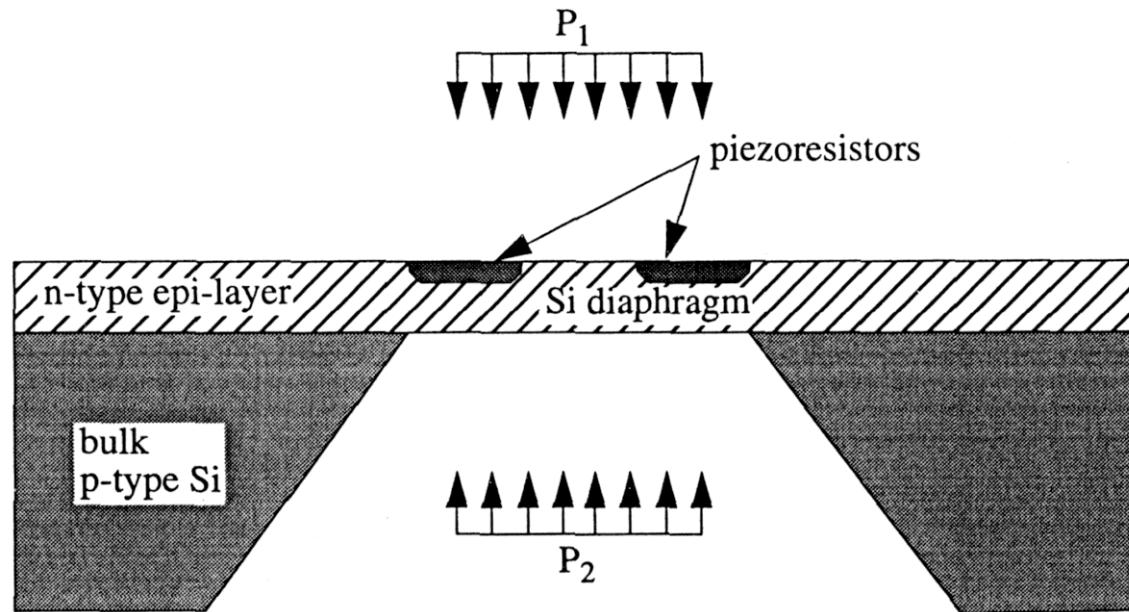
Schemat mikroskopu sił atomowych (AFM)
z optyczną detekcją ugięcia mikrobelki

Mikrosonda Mikroskopu AFM (Atomic Force Microscope)



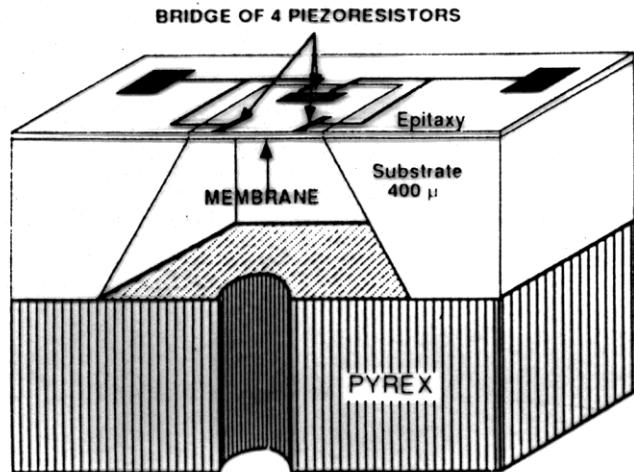
$$\begin{aligned}L_1 &= 175 \mu\text{m} \\L_2 &= 75 \mu\text{m} \\w &= 20 \mu\text{m} \\b &= 90 \mu\text{m} \\l &= 2 \mu\text{m}\end{aligned}$$

Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

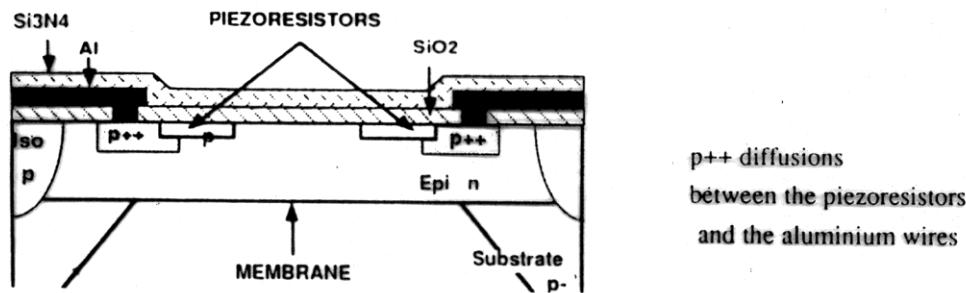


Piezorezystancyjny czujnik ciśnienia

Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

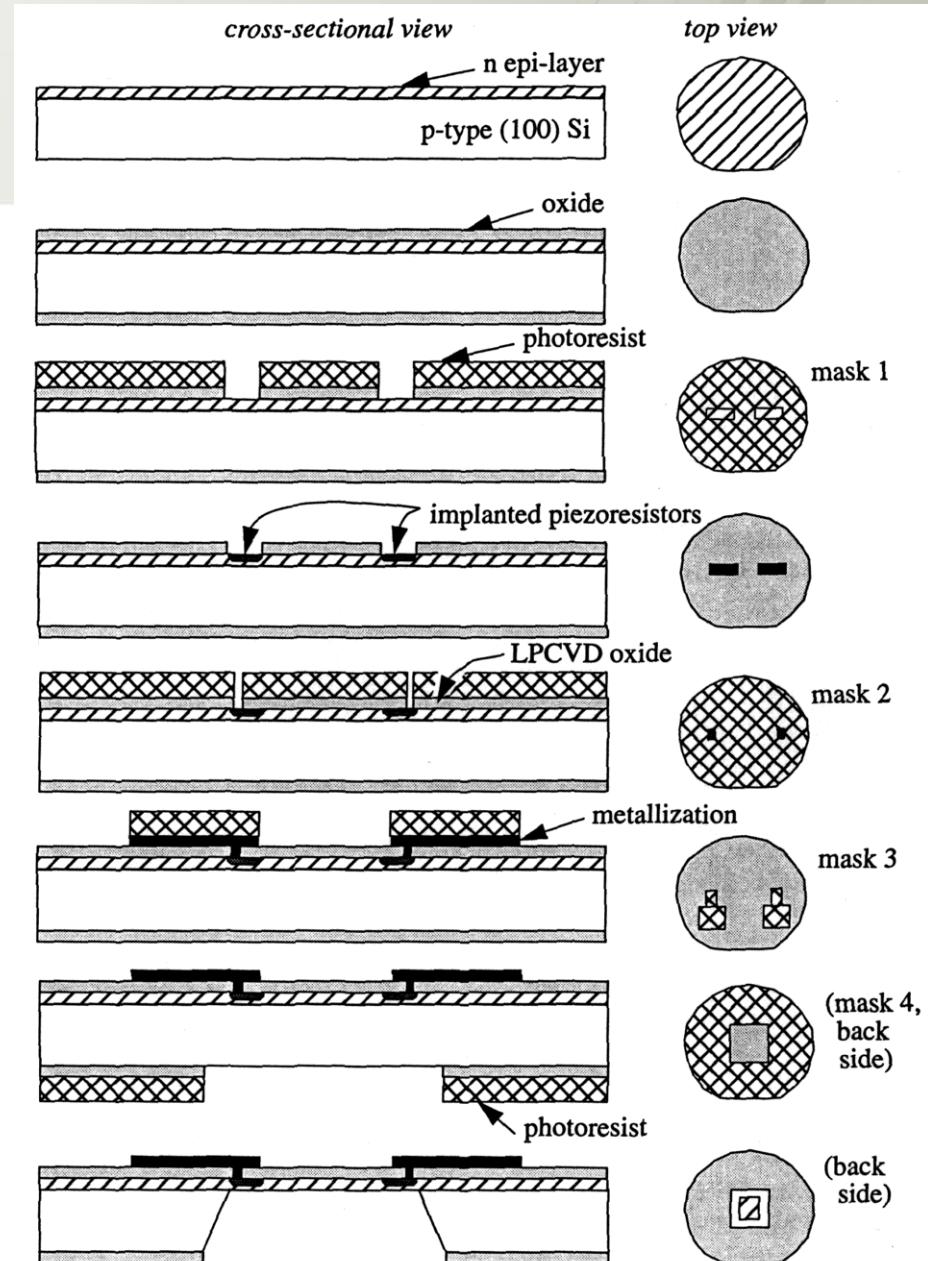


Połączenie krzem - szkło



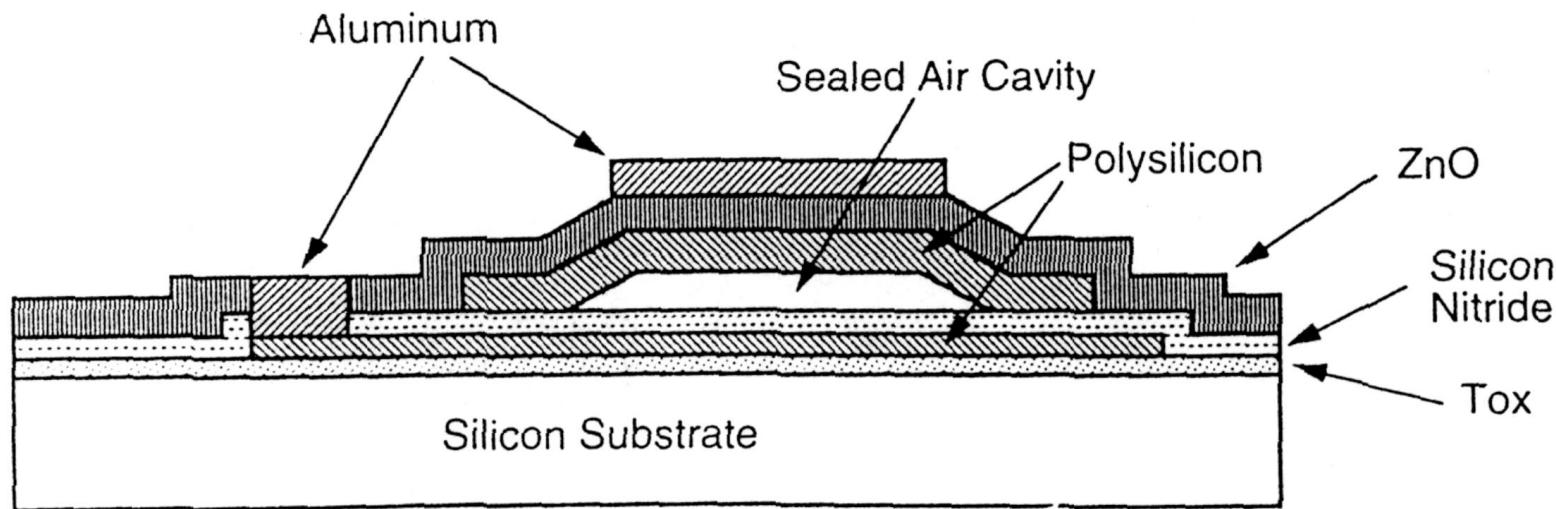
Mostek z piezorezystorami
(przekrój)

Proces technologiczny wytwarzania piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia



Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

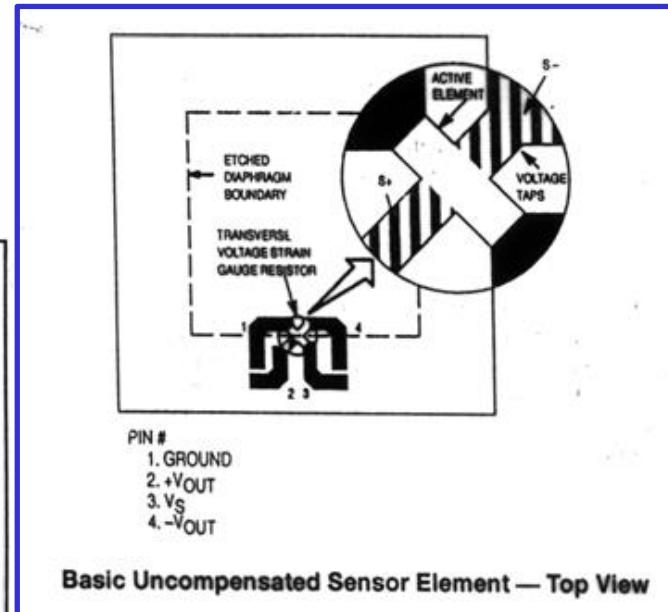
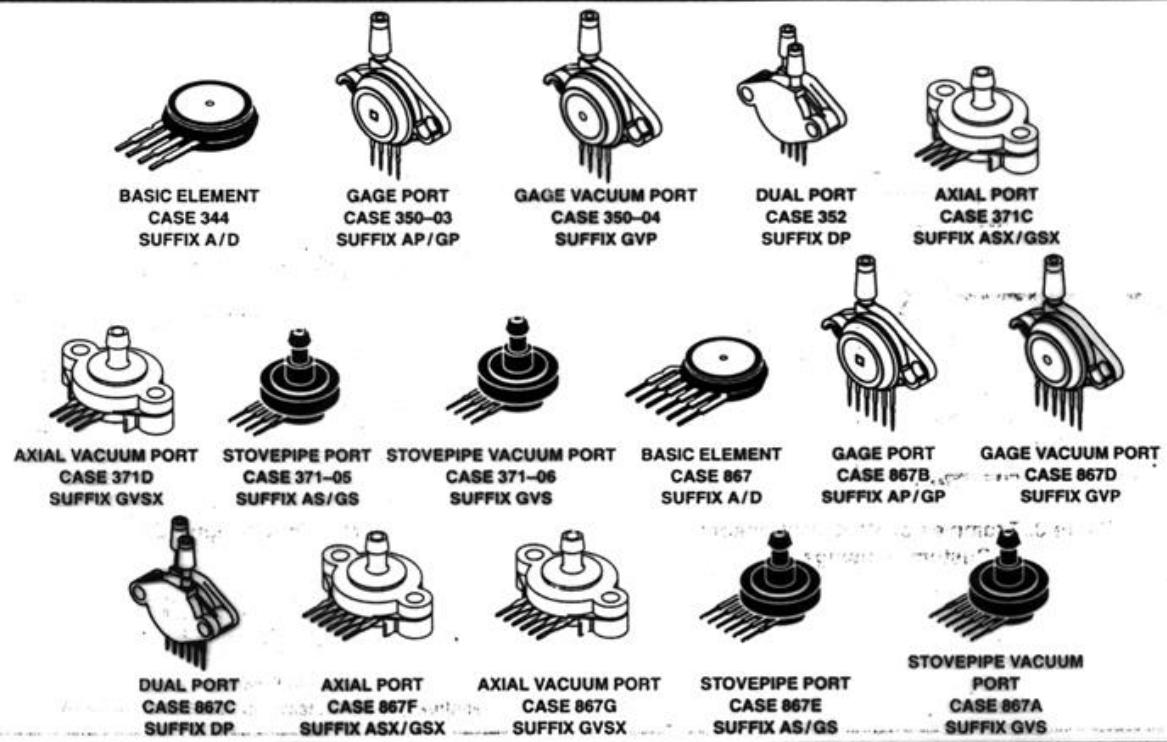
Czujnik ciśnienia z piezoelektryczną warstwą ZnO



T_{ox} – tlenek termiczny (izolacja od podłoża)
ZnO – technologia rozpylenia

Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

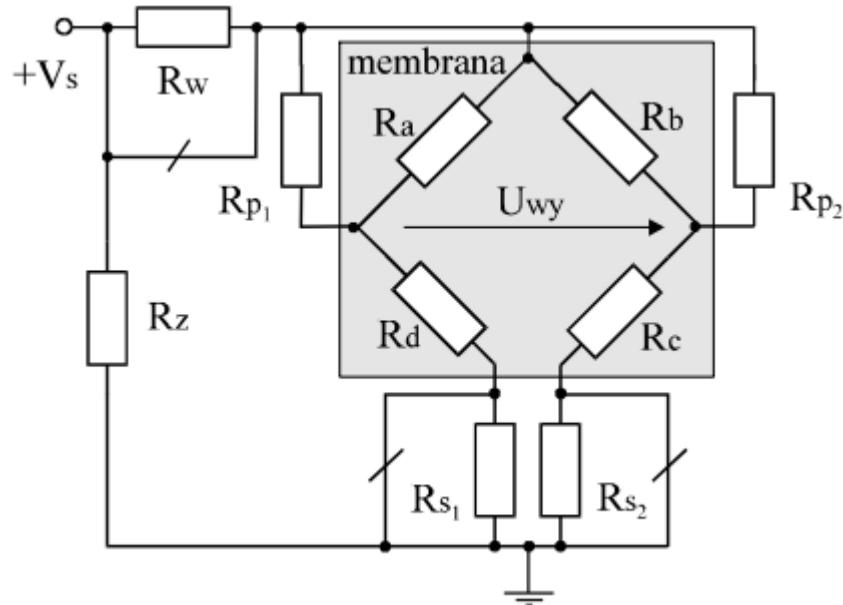
Czujniki ciśnienia firmy Motorola



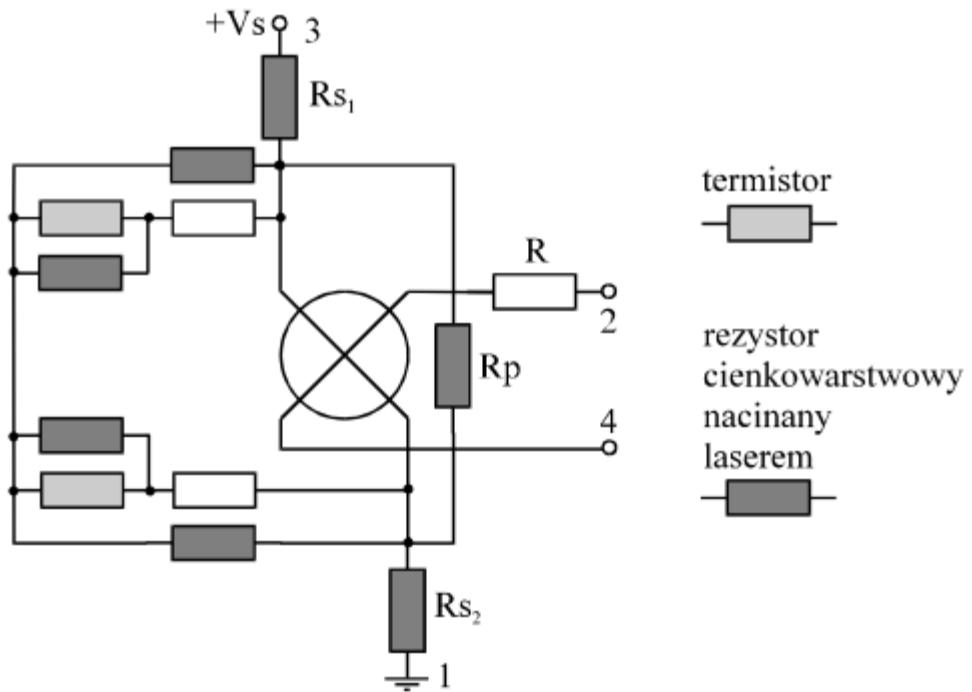
X - ducer™

Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

Zintegrowane układy kompensacji...



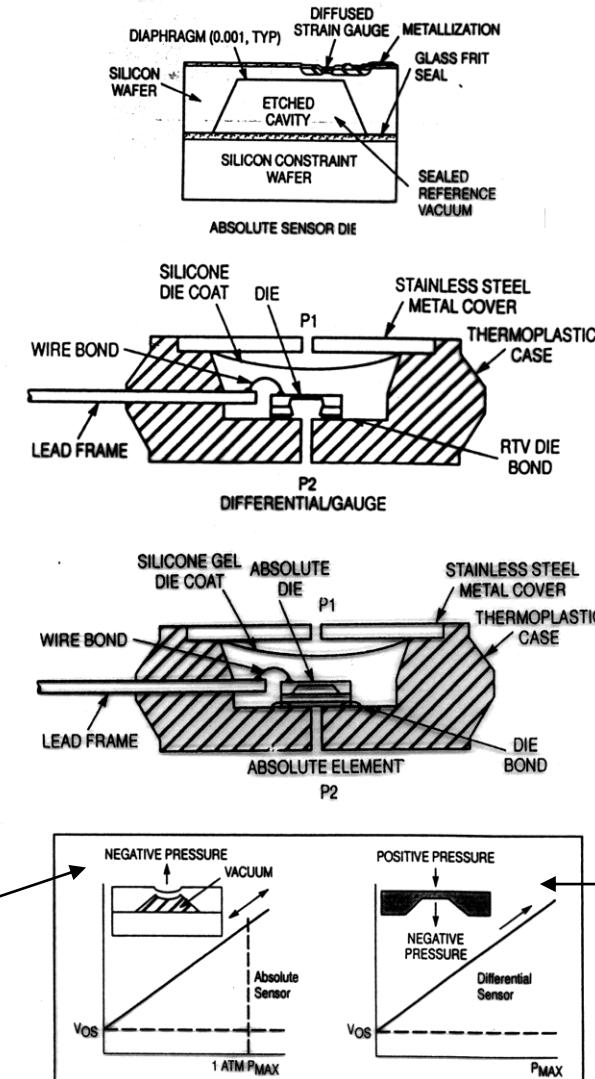
...w czujniku tradycyjnym



...w czujniku X - ducer™

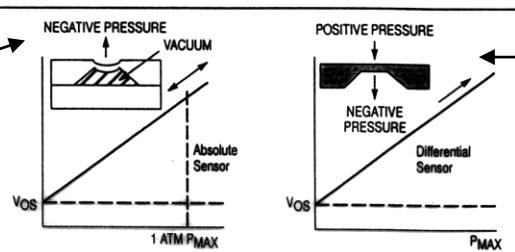
Czujniki wytwarzane w procesach zintegrowanych

Czujnik ciśnienia firmy Motorola - budowa



Pomiar ciśnienia bezwzględnego

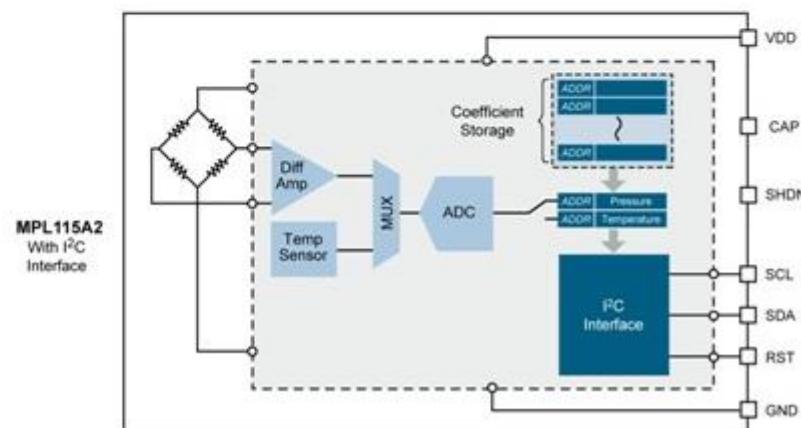
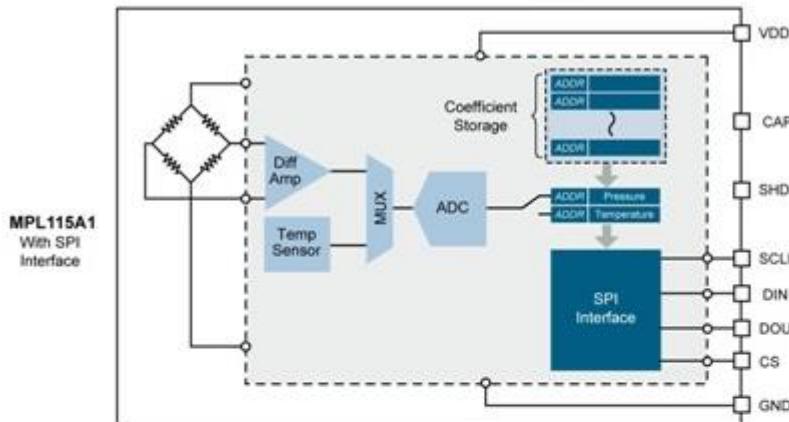
Pomiar ciśnienia różnicowego



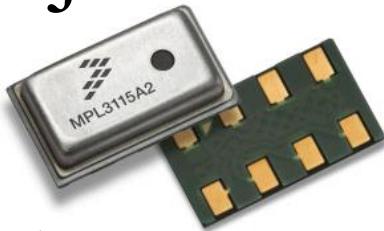
Czujnik ciśnienia MPL115A (Freescale)

- Fabrycznie skalibrowany
- 50 kPa do 15 kPa (bezwzgl.)
- dokładność 1 kPa
- zintegrowany cz. Temp. do ustalenia współcz. programowej korekcji pomiaru ciśnienia
- Zasilanie 2.375 - 5.5 V
- zintegrowany DAC 10-bit
- interfejs SPI lub I²C
-

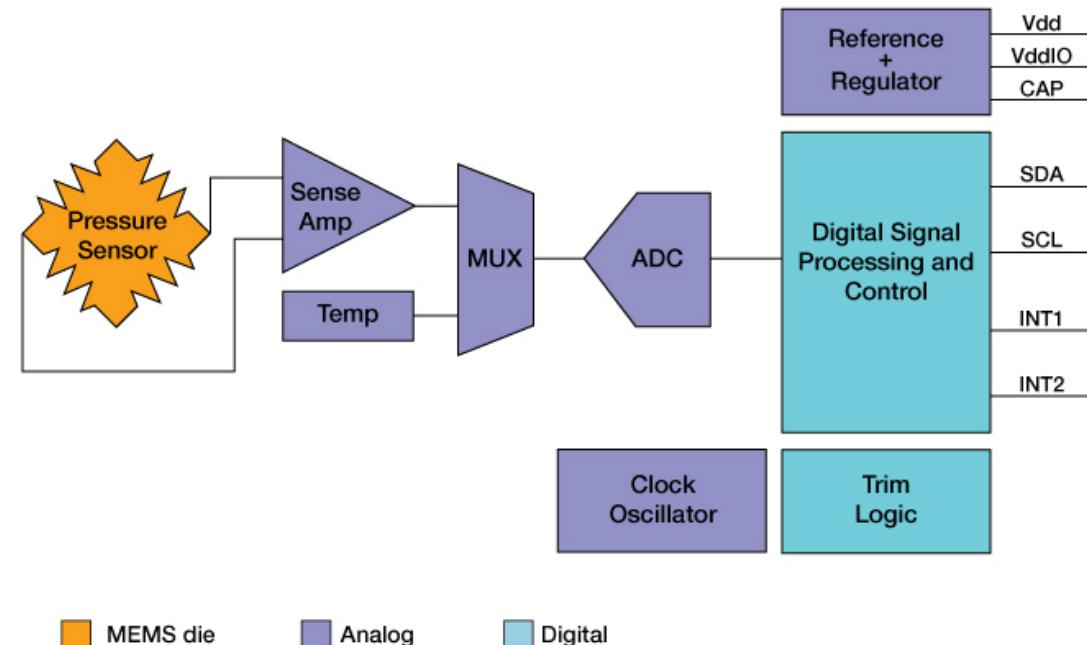
MPL115A Block Diagrams



Czujnik ciśnienia MPL3115A (Freescale)



MPL3115A2 Pressure Sensor Block Diagram

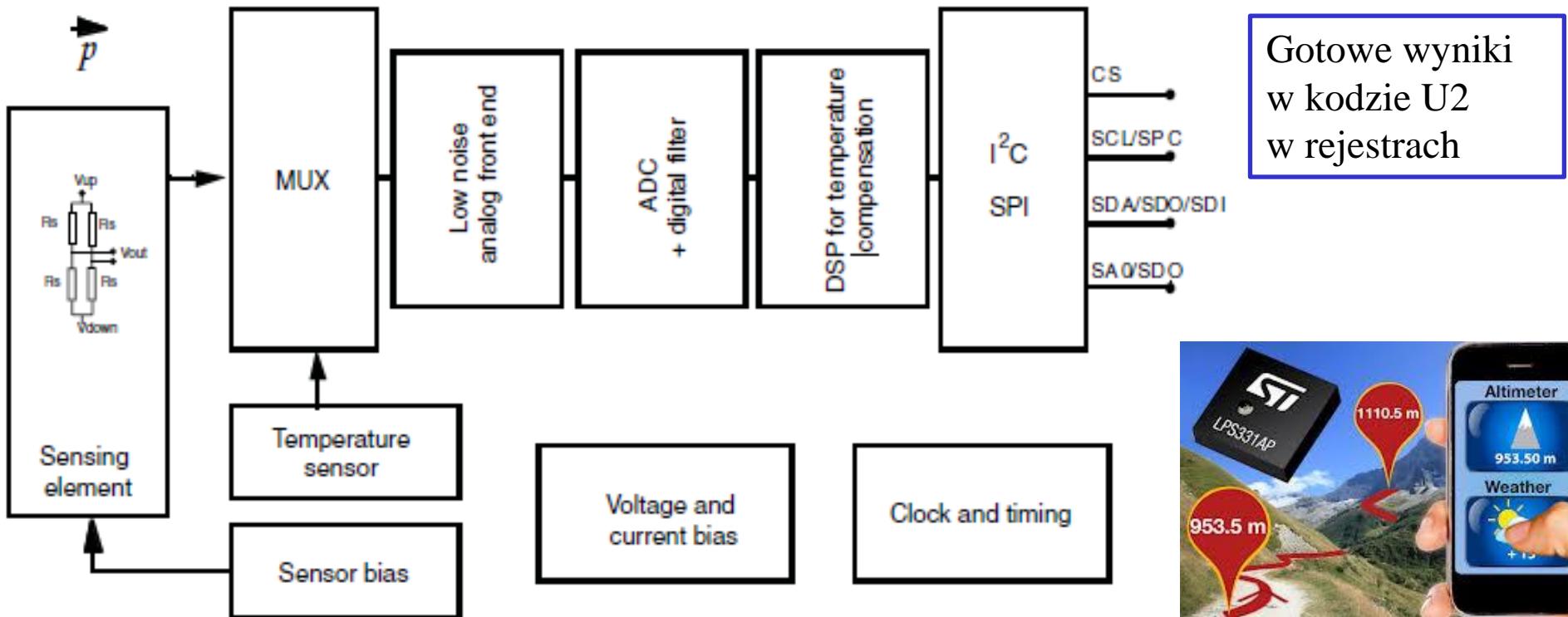


- skompensowany (program niepotrzebny), wyniki mianowane
 - zakres 20 -110 kPa
 - rozdzielcość 30 cm
 - pomiar ciśnienia: 20-bitów (Pa)
 - pomiar wysokości: 20-bitów (m)
 - pomiar temperatury : 12-bitów
 - „inteligencja” na pokładzie
 - zintegrowany przetwornik A/C
 - interfejs SPI lub I²C
 - częst. próbkowania do 128 Hz
 - 32 rejesty FIFO (32 bit)
-
- Auto wake and sleep mode enable the application to switch modes depending on activity level- activating interrupts
 - Adjustable and intelligent user controls allow the sample rate to be adjusted according to the environment for “**intelligent contextual sensing**”
 - Programmable functions allow user to specify conditions for waking a host processor via interrupts
 - Communication between sensor and host processor is minimized through smart FIFO functionality and intelligent interrupts
 - Compensation and calibration of sensor data is enabled via local computation capability on the MPL3115A2 ASI¹⁴

Czujnik ciśnienia LPS331AP (STM)

Features

- 260 to 1260 mbar absolute pressure range
- High-resolution mode: 0.020 mbar RMS
- Low power consumption:
 - Low resolution mode: 5.5 μ A
 - High resolution mode: 30 μ A
- High overpressure capability: 20x full scale
- Embedded temperature compensation
- Embedded 24-bit ADC
- Selectable ODR from 1 Hz to 25 Hz
- SPI and I²C interfaces
- Supply voltage: 1.71 to 3.6 V
- High shock survivability: 10,000 g





AGH

Czujniki temperatury

Sensory rezystancyjne można w ogólności podzielić na metalowe i półprzewodnikowe (termistory).

Rezystancja sensorów metalicznych w wąskim zakresie temp. może być przedst. w postaci liniowej zależności:

$$R(t) = R_o[1 + \alpha(t - t_o)] \quad \alpha - TWR$$

R_o – rezyst. w temp. t_o (na ogóln. 0 lub 25°C)

W szerszym zakr. temp. trzeba stos. przybliżenia w post. wielomianów wyższych rzędów.

Przykładowo dla platyny dobrym przybliżeniem w zakr. od temp. 0°C do 850°C (PN-EN 60751 zgod. z ITS90) jest wielomian drugiego stopnia

$$R(\Omega) = R_o(1 + 39,083 \cdot 10^{-4} T - 5,775 \cdot 10^{-7} T^2)$$

R_o – rez. w 0°C
T – temp. w skali Kelvina

Zmiany rezystancji:
Pt 100 : ~ 0,4 Ω/K
Ni 100 : ~ 0,6 Ω/K
Pt 1000: ~ 4 Ω/K

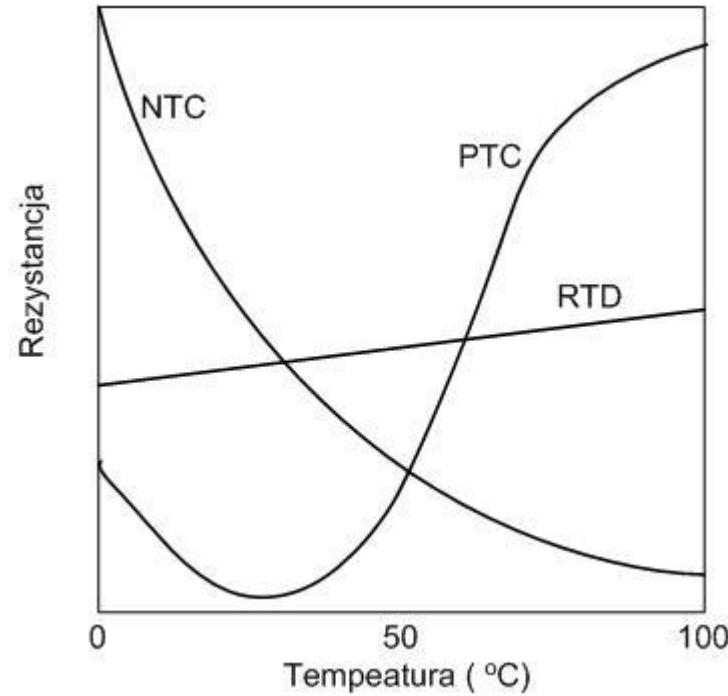
Półprzewodnikowe czujniki termorezystorowe (termistory)

Nazwą tą określa się rezystory półprzewodnikowe w postaci spieków tlenków, siarczków i selenków pierwiastków takich jak Co, Mn, Ti, Fe, Ni, Cu, Al, wytwarzanych w formie pręcików, kuleczek, kropelek, dysków itp., a także grubych warstw.

Dwie grupy:

NTC (negative temperature coefficient)

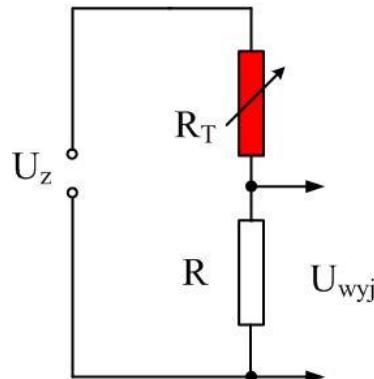
PTC (positive temperature coefficient)



*Charakterystyki termistorów NTC i PTC
w porównaniu do RTD*

Pomiar rezystancji termorezystorów

Dzielnik napięcia

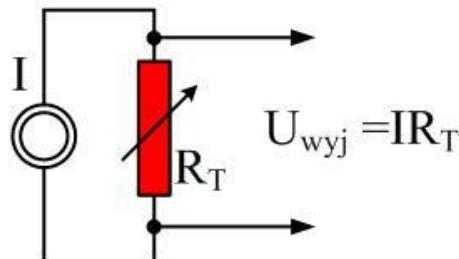


$$U_{wyj} = IR = \frac{U_z R}{R + R_T}$$

dla $R_T / R \ll 1$

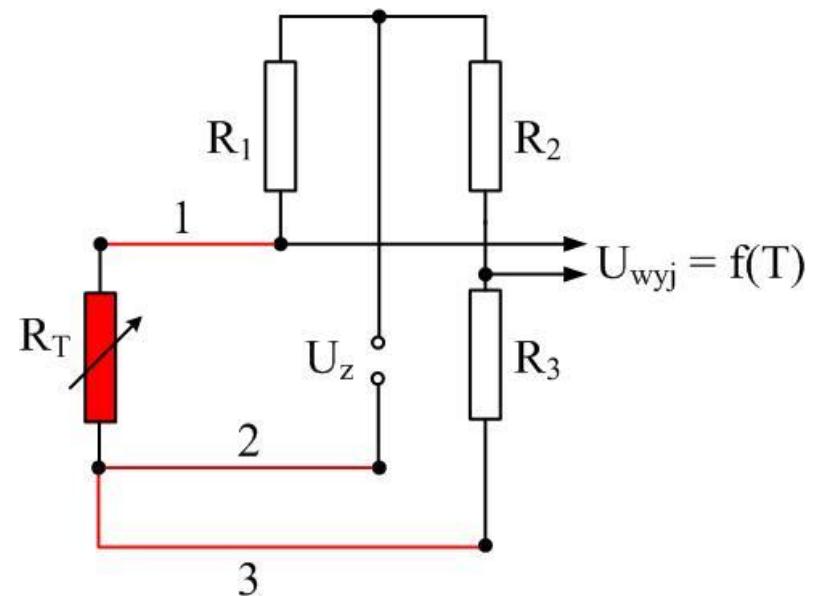
$$U_{wyj} \cong U_z \left(1 - \frac{R_T}{R}\right)$$

Pomiar spadku napięcia



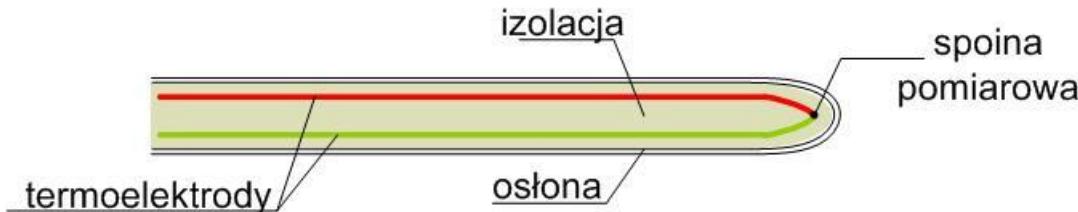
Zasilanie - źródło prądowe

Niezrównoważony mostek Wheatstone'a



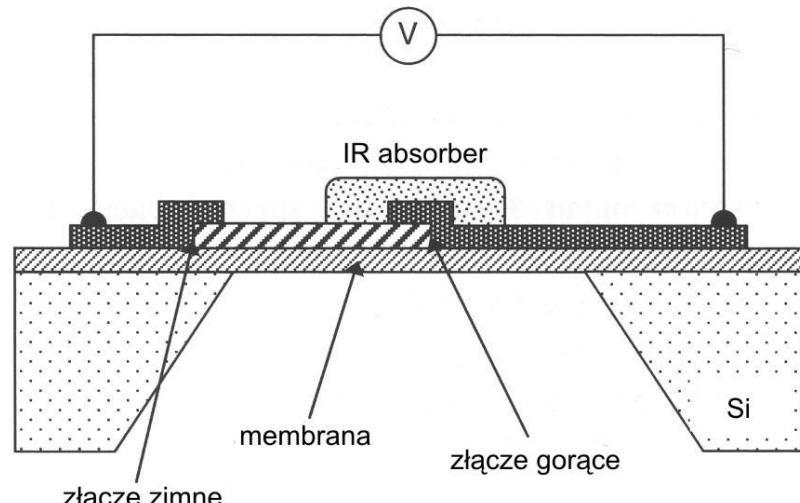
Termopary

Typowe termopary wykonywane są jako tzw. termoelementy płaszczyznowe



Z wykorzystaniem technologii mikromechanicznej wytwarzane są termopary na membranie. Ich mała pojemność cieplna i dobra izolacja termiczna umożliwiają pomiary promieniowania temperaturowego.

W przedstawionym rozwiązaniu złącze zimne znajduje się na podłożu dobrze przewodzącym ciepło. Złącze gorące umieszczone jest w centralnej części membrany o małym przewodnictwie cieplnym. Dodatkowo absorber umieszczony jest tak, aby ogrzewać złącze gorące.



Złącze p/n jako czujnik temperatury

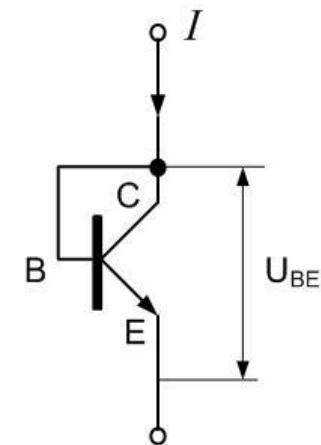
Polaryzujemy złącze p/n diody (wytw. z tranzystora) w kierunku przewodzenia.

$$I = I_S [\exp(qU_{BE}/kT) - 1]$$

dla $qU_{BE} \gg kT$

$$U_{BE} = (kT/q) \ln (I/I_S)$$

dla $I = \text{const}$ uzysk. dobrą liniowość
w zakr. -50°C do $+150^{\circ}\text{C}$



Dla tranzystorów krzemowych

$$\partial U_{BE} / \partial T \approx -2,25 \text{ mV/K} \quad \text{dla } T=300 \text{ K i } I=10 \mu\text{A}$$

I_S zależy jednak nieznacznie od temperatury.

Poprawę liniowości uzyskuje się w układzie różnicowym

Złączowy czujnik temperatury, układ scalony

Przedstawiony układ jest praktyczną realizacją omawianej metody różnicowej z wykorzystaniem złączy p/n.

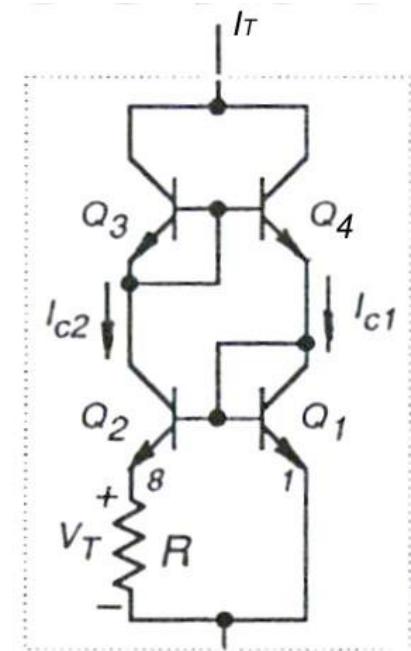
Wytwarzany jest często jako element scalony w podłożu krzemowym w układach wymagających regulacji temperatury (np. w mikromechanicznych cz. ciśnienia).

Tranzystory Q_3 i Q_4 tworzą tzw. lustro prądowe zapewniające równość $I_{C1} = I_{C2} = I$

Napięcie V_T na rezyst. R jest równe

$$V_T = V_{be1} - V_{be2} = \frac{I_T R}{2} = \left(\frac{k}{q} \ln r \right) T$$

a zatem jest proporcjonalne do temp. bezwzględnej.
Tego typu czujniki temp. nazywane są **PTAT**.



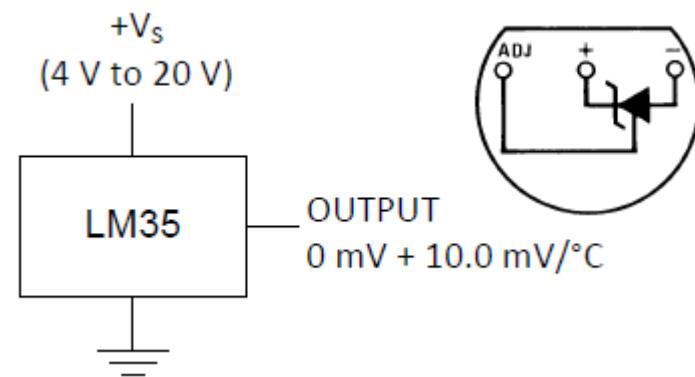
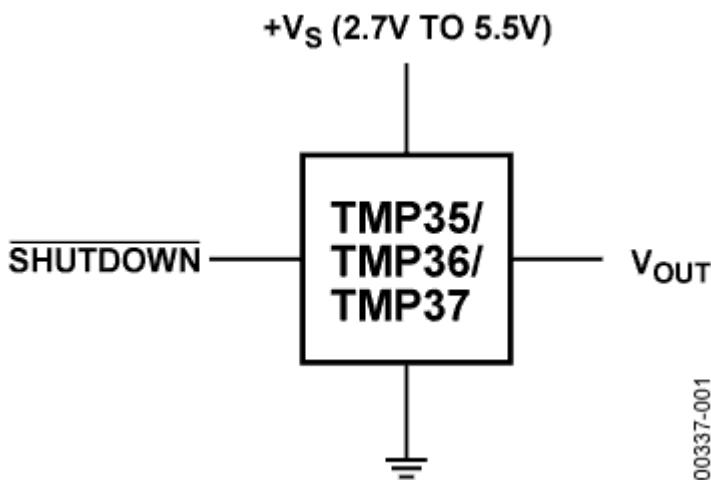
Scalony czujnik temperatury

LM35 (TI) / TMP35 (AD)



- Low Voltage Operation (+2.7 V to +5.5 V)
- Calibrated Directly in °C
- 10 mV/8°C Scale Factor (20 mV/8°C on TMP37)
- ±2°C Accuracy Over Temperature (typ)
- ±0.5°C Linearity (typ)
- Stable with Large Capacitive Loads
- Specified -40 °C to +125 °C, Operation to +150 °C
- Less than 50 µA Quiescent Current
- Shutdown Current 0.5 µA max

- Calibrated Directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10 mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at +25°C)
- Rated for Full -55°C to +150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates from 4 to 30 V
- Less than 60-µA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Nonlinearity Only ±¼°C Typical
- Low Impedance Output, 0.1 Ω for 1 mA Load

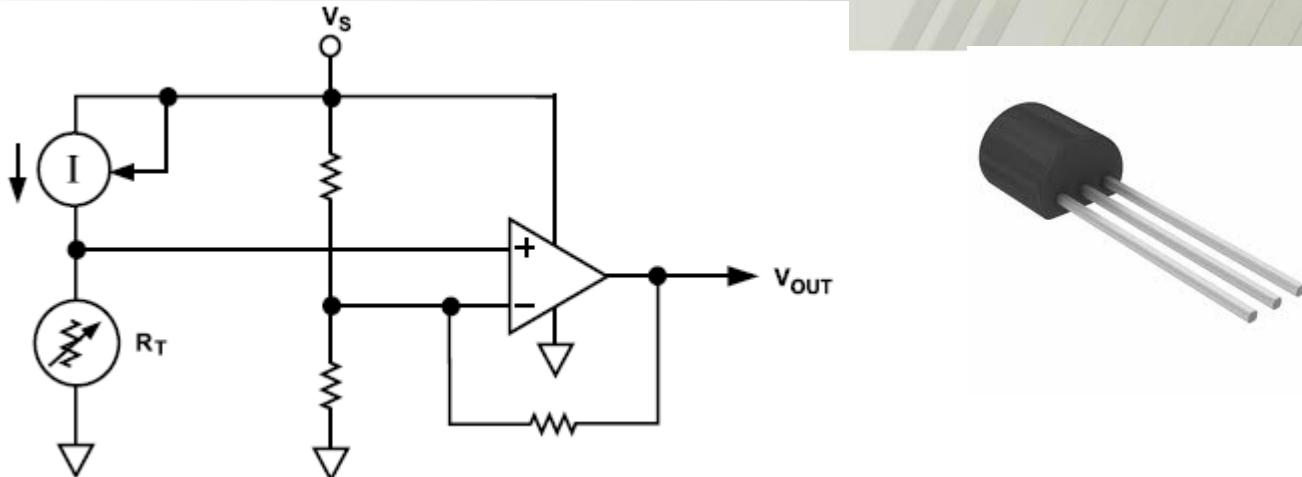


Podbne: LM135/LM235/LM335

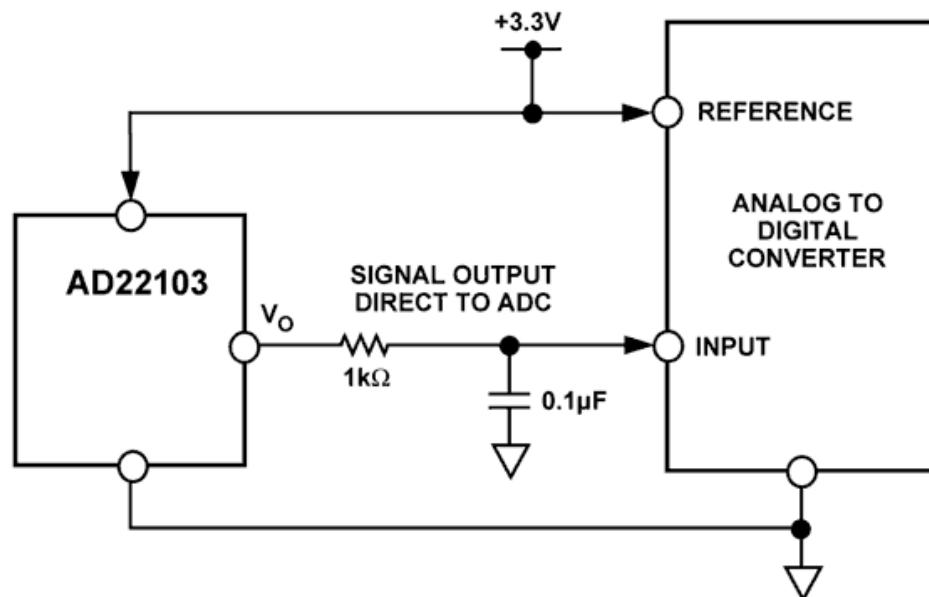


Scalony czujnik temperatury AD22103

AGH



Zasilanie 3.3V
TC: 28 mV/C
Zakres 0-100°C
Dokł. 2.5%
Uwyj ~Temp*Vs (proporcjonalny)
Mały współcz. samonagrzewania



Scalony wzmacniacz do termopary AD594/AD595

**Pretrimmed for Type J (AD594) or
Type K (AD595) Thermocouples**

Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs

Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C

Built-In Ice Point Compensation

Wide Power Supply Range: +5 V to ± 15 V

Low Power: <1 mW typical

Thermocouple Failure Alarm

Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy

Setpoint Mode Operation

Self-Contained Celsius Thermometer Operation

High Impedance Differential Input

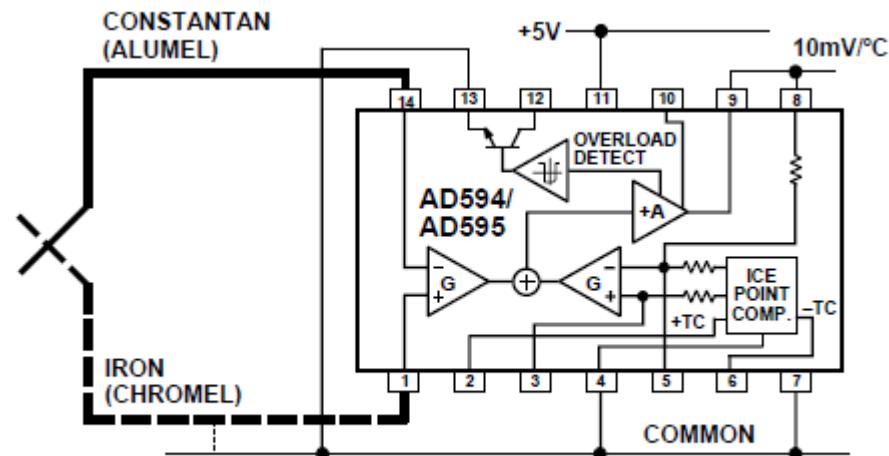


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

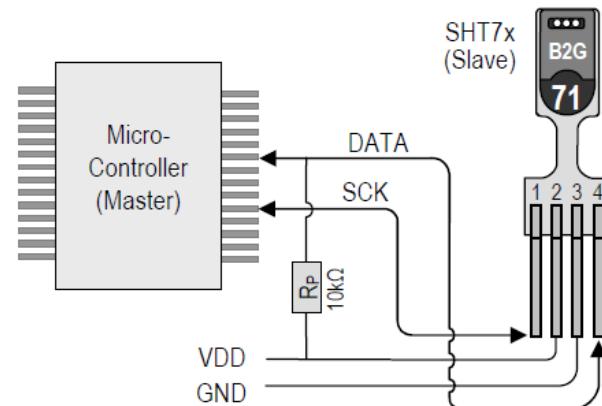
Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C, $V_S = -5$ V, +15 V)

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-0.995	-189	-0.777	-189
-10	-0.501	-94	-0.392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	.507	101	.397	101
20	1.019	200	.798	200

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722

Scalony czujnik temperatury i wilgotności SHT 71/75 (Sensirion)

- Czujnik + układy kondycjonujące + ADC + I²C
- Każdy czujnik kalibrowany indywidualnie w fabryce
- Uwaga: wrażliwy na światło słoneczne i UV ;) (starzenie)

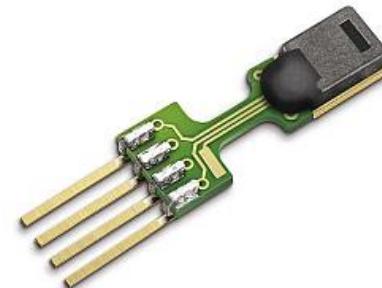


Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy ² SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

Temperature

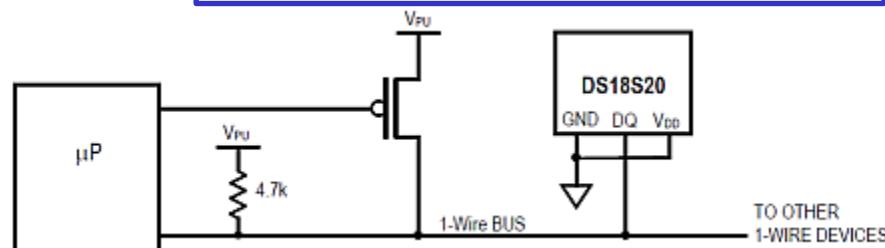
Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy ² SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr



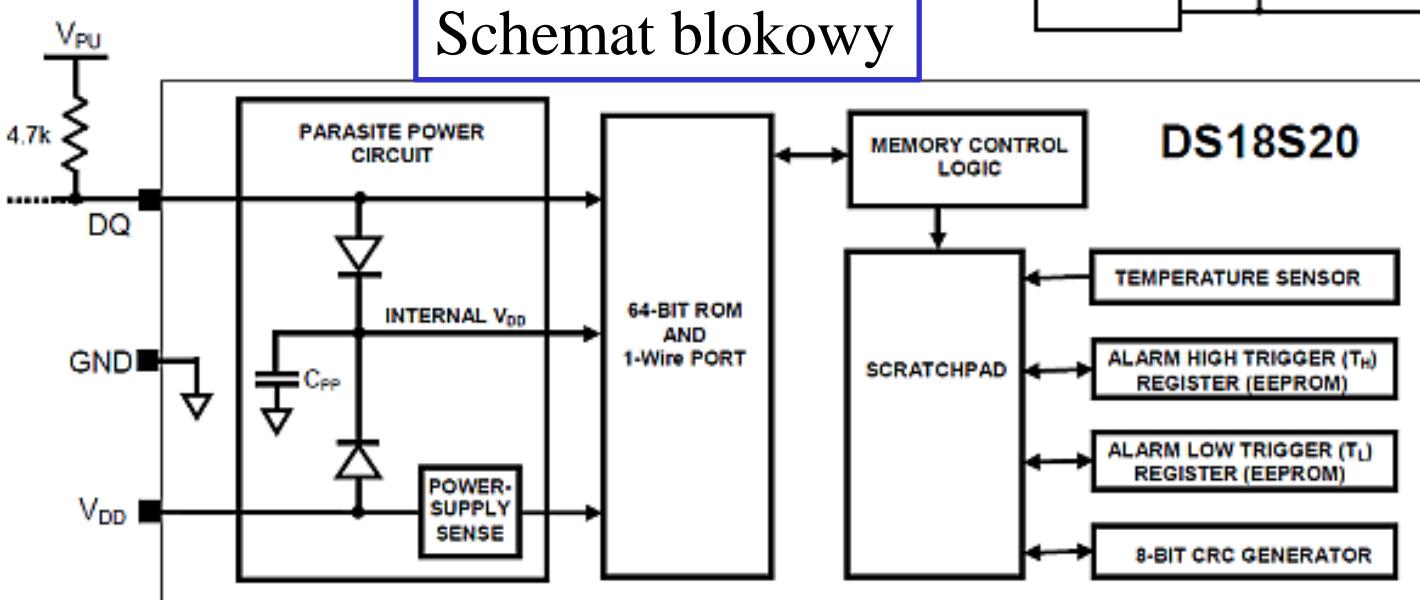
Scalony cyfrowy czujnik temperatury DS18S20 (Maxim)

- interfejs 1-wire
- możliwość pracy bez zasilania Vpu (*parasite power mode*) – zasilanie okresowe podczas wysokiego stanu na DQ
- 64 bitowy ROM zawiera unikalny kod urządzenia
- możliwość dołączenia nieograniczonej liczby czujników
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- rejesty alarmu T_L i T_H
- rozdzielcość 9-bitów

Tryb zasilania pasożytniczego



Schemat blokowy



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-szkłanych w technice mikrosystemów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- J. M. Łysko, *Anizotropia trawienia i piezorezystancji w kryształach poloprzewodników. 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.memsnet.org/mems/fabrication.html>