

PODSTAWY AKUSTOELEKTRONIKI

ppłk dr inż. Mateusz PASTERNAK

bud. 61 p. 25, tel. 683-76-67

Mateusz.Pasternak@wel.wat.edu.pl

[http:// strony.aster.pl/mpasternak](http://strony.aster.pl/mpasternak)

konsultacje osobiste: czwartki po godz. 16
oraz poprzez dostępne media elektroniczne

Zaliczenie wykładów na podstawie pozytywnego wyniku
kolokwium końcowego.

Zaliczenie laboratoriów na podst. sprawozdań

Program przedmiotu:
30 godz. w tym 18 godz. wykładów, 8 godz. Ćwiczeń
I 4 godz. laboratorium

2 pkt. ECTS

Tematyka wykładów

Informacje wstępne
Technologia urządzeń akustoelektronicznych
Piezotransformatory
Piezoaktywatory
Samozasilająca się elektronika
Specjalne zastosowania dźwięku
Zaawansowane modele przetworników międzypalczastych
Podstawy projektowania filtrów z falą powierzchniową
Podstawy projektowania rezonatorów z falą powierzchniową
Współpraca urządzeń akustoelektronicznych z zewnętrznymi układami elektronicznymi

Tematyka ćwiczeń rachunkowych

Obliczanie geometrii przetworników fal akustycznych
Projektowanie rezonatorów akustycznych
Projektowanie filtrów akustycznych
Projektowanie układów dopasowania urządzeń akustycznych

Niezbędny KALKULATOR

Tematyka ćwiczeń laboratoryjnych

Pomiar parametrów rezonatorów akustoelektronicznych
Badanie układów dopasowania urządzeń akustycznych

LITERATURA

W. Soluch (red.)	Wstęp do piezoelektroniki 1980
W. Soluch (red.)	Filtry piezoelektryczne 1982
A. Śliwiński	Ultradźwięki i ich zastosowania 2001
Z. Jagodziński	Przetworniki ultradźwiękowe 1997
A. Kawalec, M. Pasternak	Podstawy Akustoelektroniki e-skrypt
A. A. Oliner	Acoustic surface waves 1978
H. Matthews	Surface wave filters, design, construction and use 1977
W. P. Mason	Physical Acoustic. Principles and methods 1970
G. Kino	Acoustic Waves : Devised Imaging & Analog Signal 1987

WYKŁAD 1

Informacje wstępne. Technologia urządzeń akustoelektronicznych

ELEKTRONIKA WSPÓŁCZESNA

ELEKTRONIKA ANALOGOWA

ELEKTRONIKA CYFROWA

TECHNIKA MIKROFAL

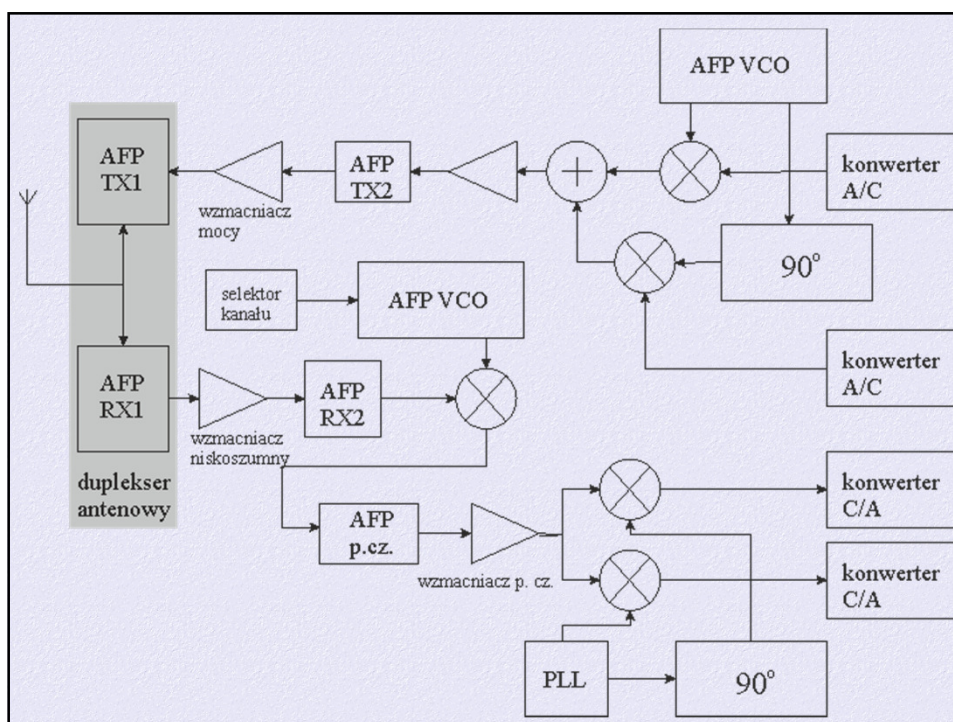
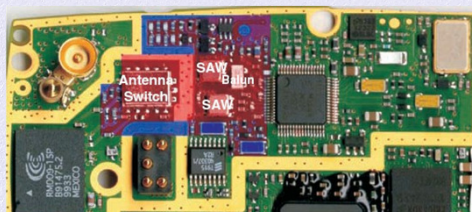
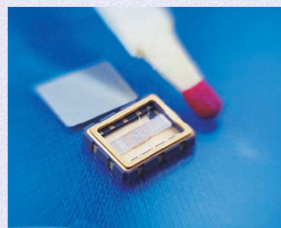
OPTOELEKTRONIKA

AKUSTOELEKTRONIKA

ELEKTRONIKA KWANTOWA

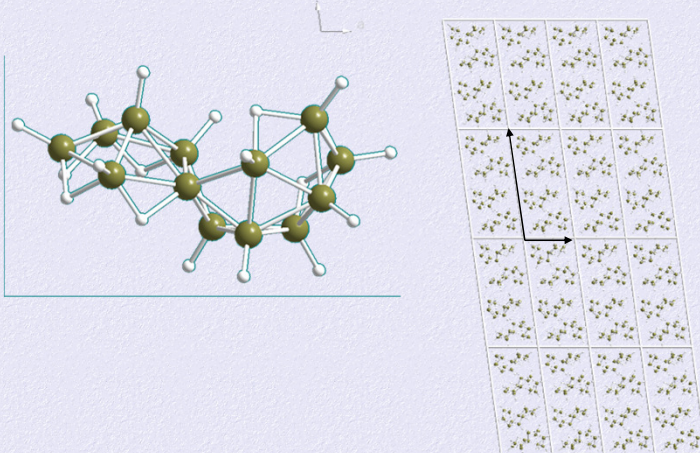
ZASTOSOWANIA AKUSTOELEKTRONIKI

- Obróbka sygnałów złożonych
- Filtracja dopasowana
- Generacja sygnałów złożonych
- Stabilizacja drgań
- Mikromechanika
- Sensory
- Zdalna identyfikacja

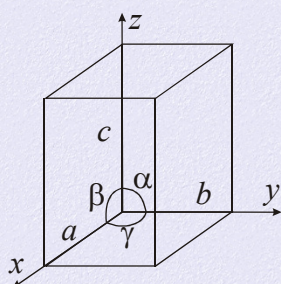


κρύσταλλος - lód

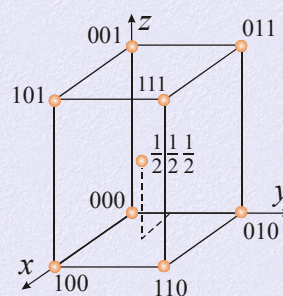
Kryształ to stan skupienia materii, w którym cząsteczki, atomy lub jony zajmują ściśle określone miejsca w przestrzeni i mogą jedynie drgać tylko w obrębie tychże miejsc. W odróżnieniu od ogólnie rozumianego ciała stałego (np. ciała amorficznego) kryształy posiadają określoną symetrię.



Układ krystalograficzny opisuje się często za pomocą sieci Bravais'a wypełniającą przestrzeń przez wielokrotne powtarzanie translacji tzw. komórki elementarnej. Sieci Bravais uzyskiwane są przez złożenie 7 systemów krystalograficznych i 4 sposobów centrowania. Spośród teoretycznie możliwych 28 (7×4) sposobów złożenia w naturze występuje tylko 14.

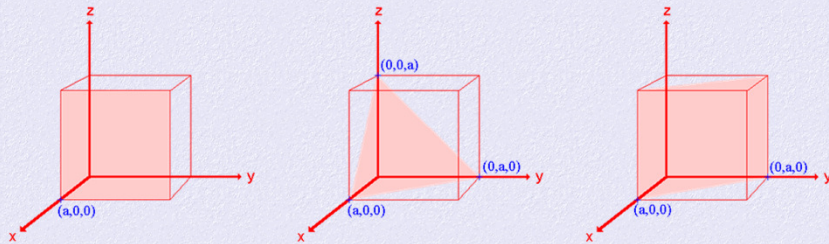


Komórka elementarna
osie krystalograficzne
stałe sieciowe



Sieć przestrzenna
wskaźniki węzłów sieci

Wskaźniki Millera



UKŁADY KRYSTALOGRAFICZNE

układ regularny (sześcienny) $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (sól kamienna, diament)

układ tetragonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (kasyteryt, cyrkon, wezuwian)

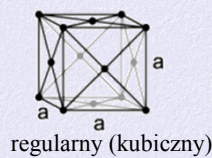
układ heksagonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ (beryl, apatyt, grafit)

układ trygonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ (kalcyt, korund, kwarc)

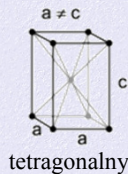
układ rombowy $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (siarka, oliwin, struwit)

układ jednoskośny $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$ (gips, ortoklaz)

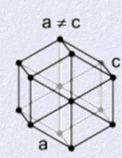
układ trójskośny $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ (cyanit, aksynit)



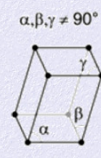
regularny (kubiczny)



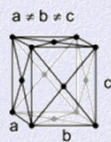
tetragonalny



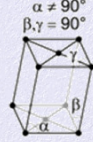
heksagonalny



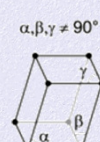
trygonalny



rombowy



jednoskośny

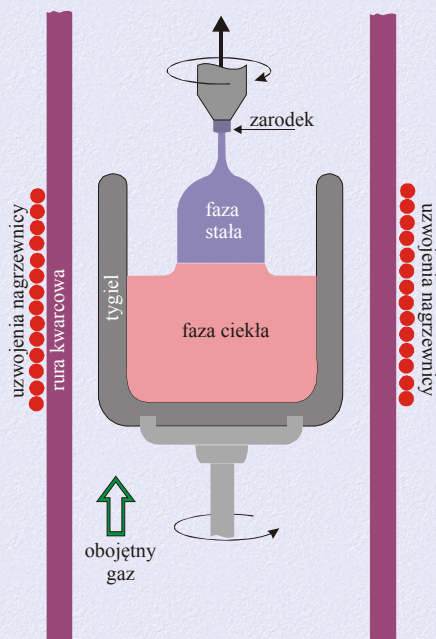


trójskośny

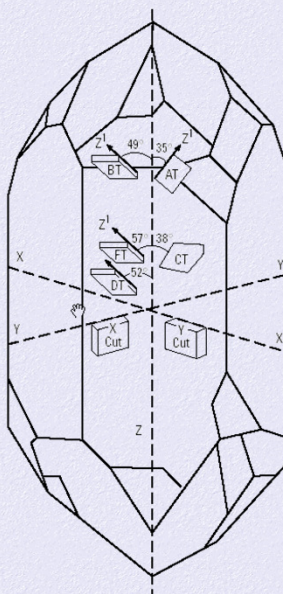
Najśłynniejsze polskie nazwisko
w świecie techniki

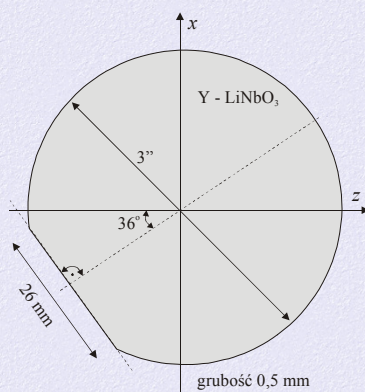
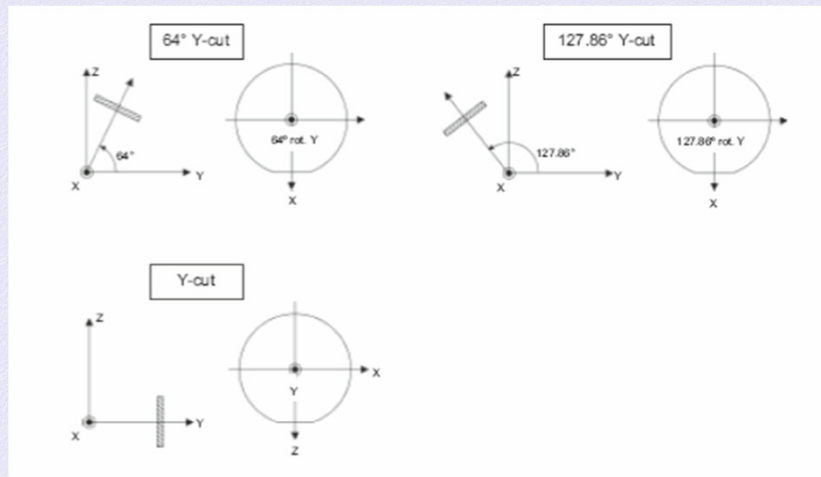


Prof. Jan Czochralski
1885-1953



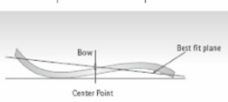
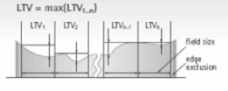
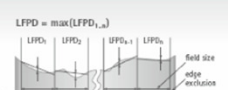
„Wyciąganie” monokryształu z fazy ciekłej metodą Czochralskiego.





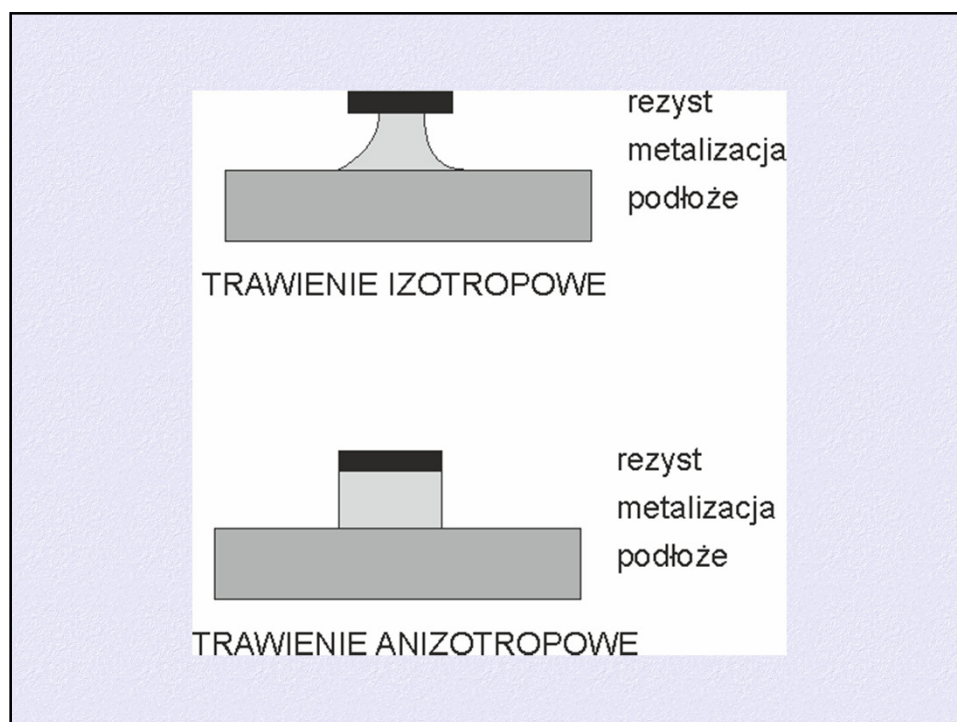
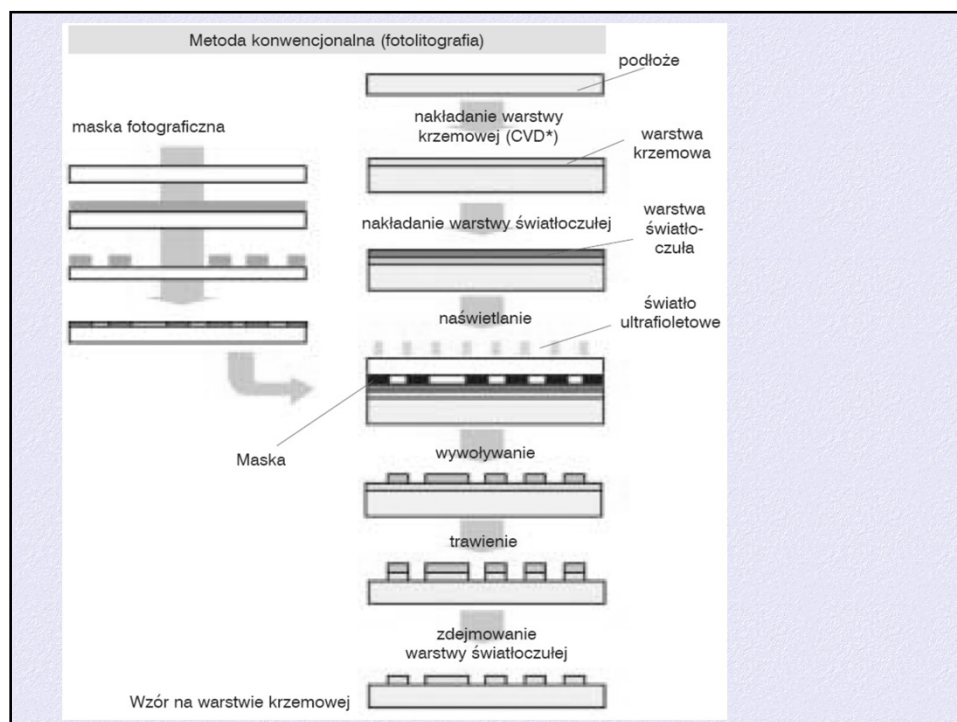
czystość kryształu
 liczba wakansów na jedn. obj.
 rozrzut grubości mierzony w czterech punktach i w środku płytki
 promień krzywizny płytki
 niejednorodności powierzchni

Podstawowe parametry płytek piezoelektrycznych

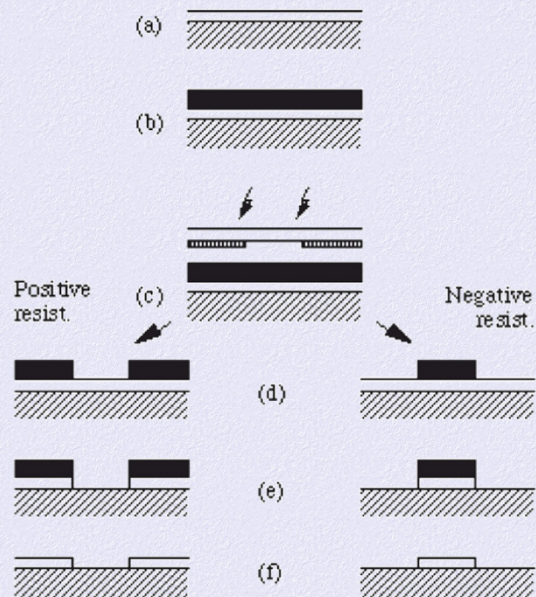
Parameter	Description	Principle
Global parameters		
TTV Total Thickness Variation	Distance between the highest and lowest points of the surface Vacuum-clamped wafer Taper is included	$TTV = A + B $ 
TIR Total Indicated Reading	Sum of the maximum positive and negative deviation from the focal plane Vacuum-clamped wafer Taper is eliminated	$TIR = A + B $ 
Warp	Sum of the maximum positive and negative deviation from the focal plane Vacuum-unclamped wafer	$Warp = A + B $ 
Bow	Distance between the surface and the best fit plane in the center of the wafer Vacuum-unclamped wafer Value can be positive or negative	
Local parameters		
LTV Local Thickness Variation	Distance between the highest and lowest point of the surface in a field of special size (e.g. 15x15 mm²) Vacuum-clamped wafer, Taper is included	$LTV = \max(LTV_{i,j})$ 
LFPD Local Focal Plane Deviation	The greatest distance either above or below an established focal plane in a field of special size (e.g. 15x15 mm²) Vacuum-clamped wafer, Taper is eliminated	$LFPD = \max(LFPD_{i,j})$ 

Typowe dane dla płytek

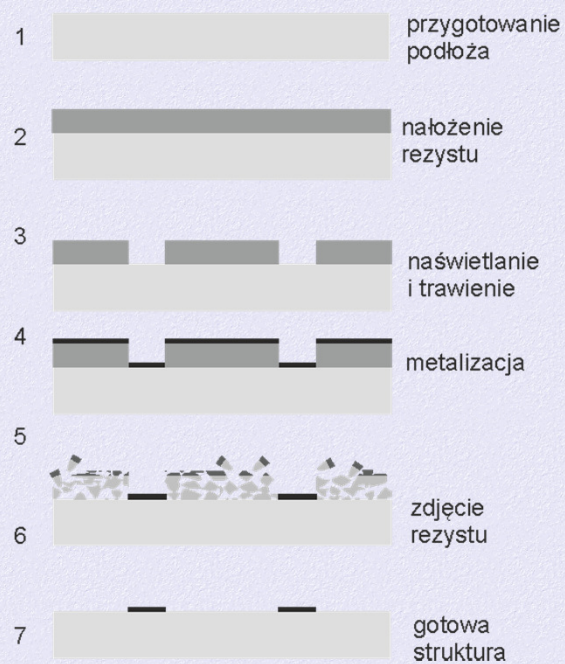
Wafers for Surface Acoustic Wave (SAW) Devices			
4" LiNbO₃ (LN) Wafers			
Commodity	Czochralski ("CZ") grown Lithium Niobate (single crystal, congruent)		
Orientation	64° rotated Y-cut ± 0.25°	127.86° rot. Y-cut ± 0.25°	Y-cut ± 0.25°
Diameter	100.0mm ± 0.5mm	100.0mm ± 0.5mm	100.0mm ± 0.5mm
Orientation Flat	32mm ± 2mm perpendicular to X ± 0.25°	32mm ± 2mm perpendicular to X ± 0.25°	32mm ± 2mm perpendicular to Z ± 0.25°
Thickness	350µm ± 30µm 500µm ± 30µm	350µm ± 30µm 500µm ± 30µm	350µm ± 30µm 500µm ± 30µm
Propagating Surface	"+" - side, Ra ≤ 7 Å	"+" - side, Ra ≤ 7 Å	"+" - side, Ra ≤ 7 Å
Wafer Backside	GC#1000 lapped & etched 0.2µm ≤ Ra ≤ 0.5µm	GC#1000 lapped & etched 0.2µm ≤ Ra ≤ 0.5µm	GC#1000 lapped & etched 0.2µm ≤ Ra ≤ 0.5µm
TTV	≤ 12µm		
LTV	≤ 1.5µm within an area of 5mm x 5mm		
PLTV	≥ 95% (3mm from edge excluded)		
Bow	-30µm ≤ bow ≤ +30µm		
Warp	≤ 60µm		
Curie Temperature	1142°C ± 2°C		



Fotolitografia pozytywowa i negatywowa



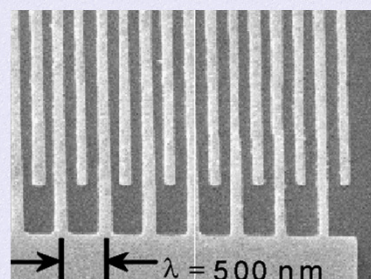
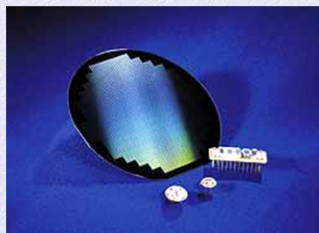
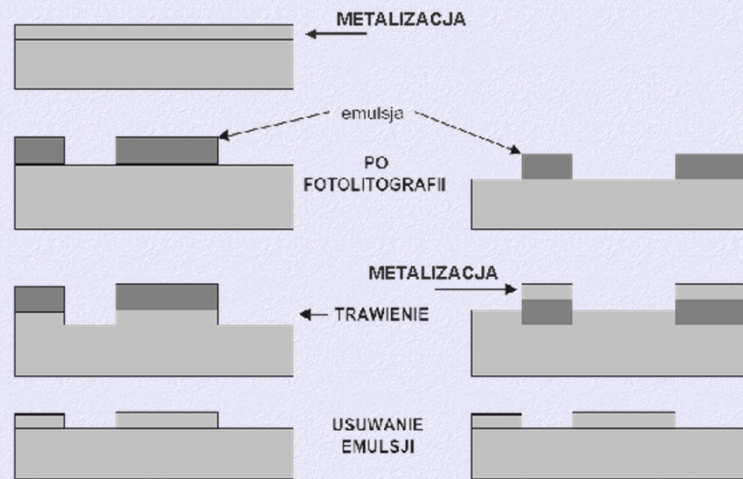
Lift-off



Porównanie

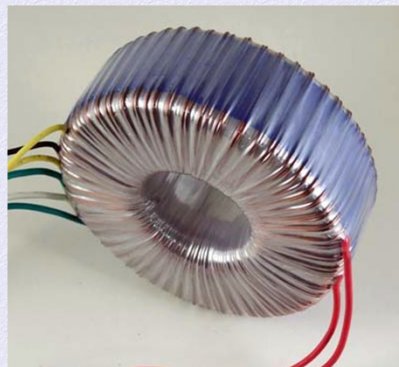
fotolitografia klasyczna
(metoda subtraktywna)

lift-off
(metoda addytywna)

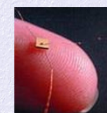


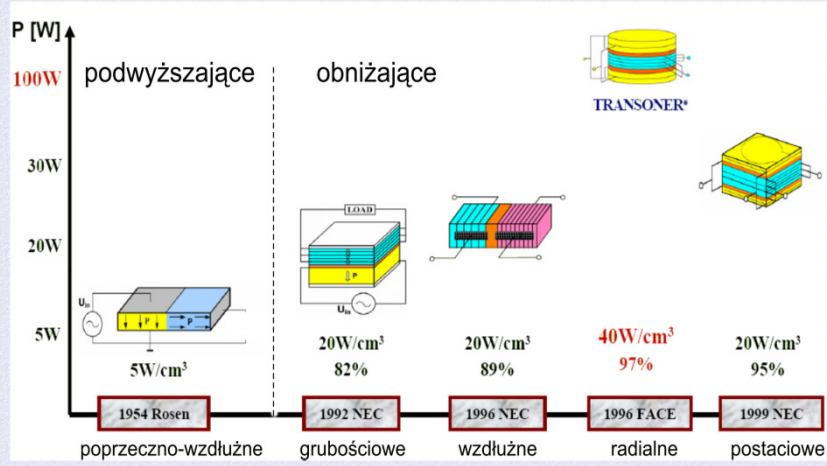
WYKŁAD 2

Piezotransformatory



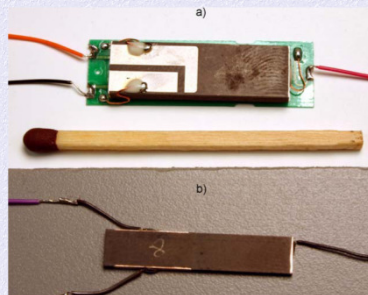
Moc właściwa osiąga 50 W/cm^3
o 95 % lepiej niż konwencjonalne
transformatory Tesli



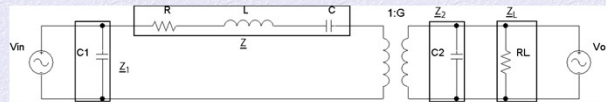


27

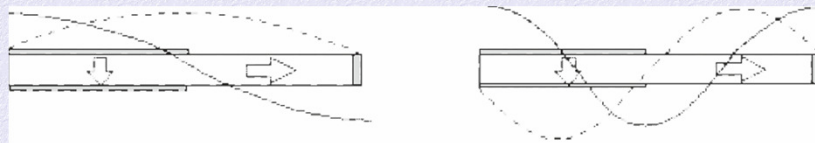
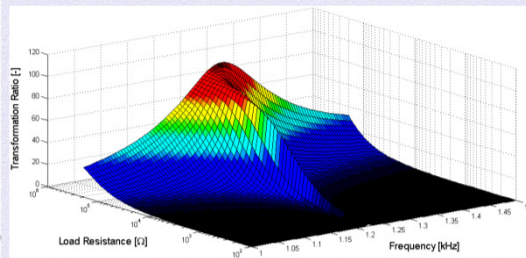
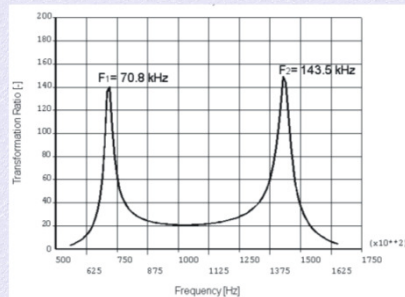
Transformator Rosena



$$G \approx \frac{L d_{31}}{D d_{33}}$$

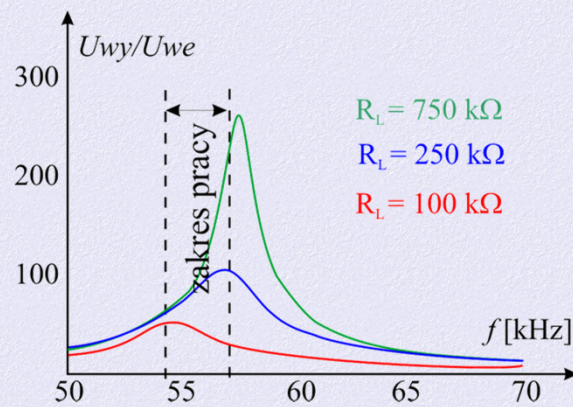


$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{G} \frac{G^2 Z_2 \parallel Z_L}{Z + G^2 Z_2 \parallel Z_L}$$

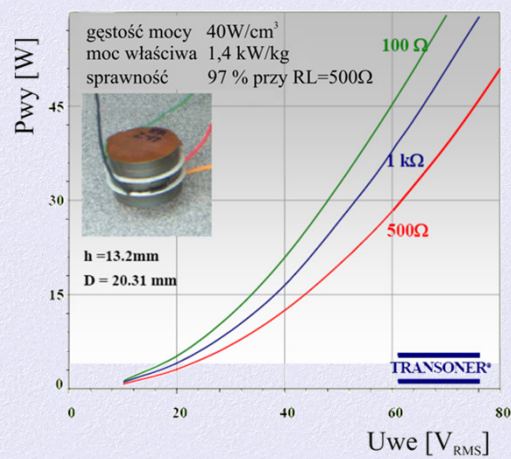
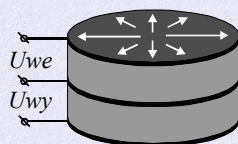


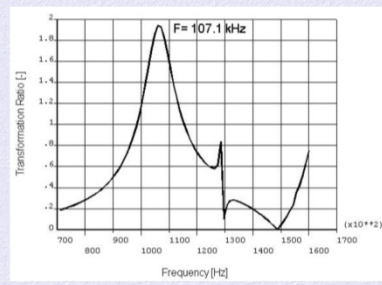
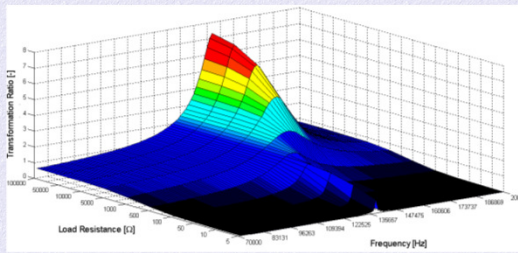
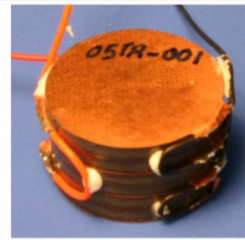
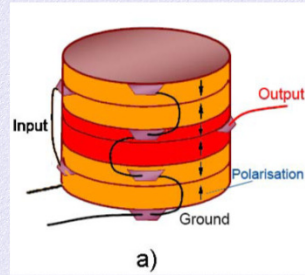
Type of element	Size of elements			Weight	Resonant Freq.		Capacitance	
	L	W	T	10E-3	f/2	f	C1	C2
	mm			kg.	kHz.		pF	
Z0.7N2.7X10R-E(C-205)	10	2.7	0.7	0.15	166	332	270	5.0
Z1.2N5.4X20R-E(C-205)	20	5.4	1.2	1.00	83	166	630	9.0
Z1.8N8.5X37R-E(C-205)	37	8.5	1.8	4.50	45	90	1200	11.5
Z2.9N10.8X40R-E(C-205)	40	10.8	2.9	10.00	42	84	1000	22.0
Z2N13X50R-E(C-205)	50	13.0	2.0	10.20	33	66	2300	14.5

Przekładnia zależy od częstotliwości i obciążenia



Transoner





Schemat zastępczy transonera

$$Cd1 = \frac{N_1 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T \cdot S_{11}^E}\right)}{t_1}$$

$$R = \frac{\sqrt{2 \cdot \rho \cdot S_{11}^E} \cdot (N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2)}{16 \cdot r \cdot Q_m \cdot (N_1 \cdot d_{31})^2}$$

$$L = \frac{\rho \cdot S_{11}^E \cdot (N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2)}{8 \cdot \pi \cdot (N_1 \cdot d_{31})^2}$$

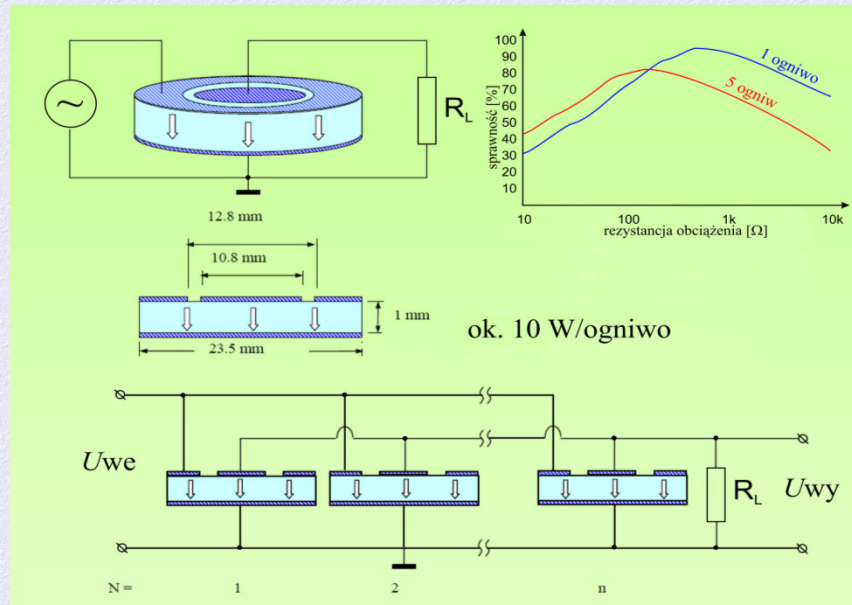
$$C = \frac{16 \cdot r^2 \cdot (d_{31} \cdot N_1)^2}{\pi \cdot S_{11}^E \cdot (N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2)}$$

$$Cd2 = \frac{N_2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T \cdot S_{11}^E}\right)}{t_2}$$

$$N = \frac{N_1}{N_2}$$

N_1 liczba warstw wejściowych
 N_2 liczba warstw wyjściowych
 - deformacja przy stałym natężeniu pola el.
 Q_m – dobroć mechaniczna
 t_1 t_2 grubości warstw

Transformator radialny

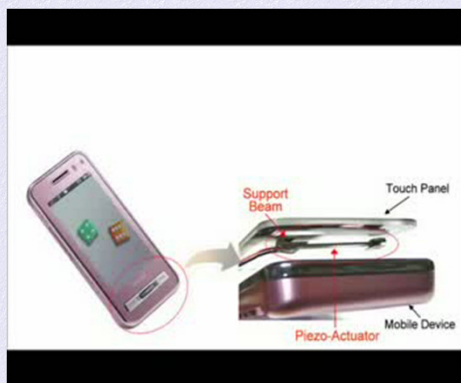


WYKŁAD 3

Aktywatory
(serwomechanizmy)

Aktywatory

Zjawisko piezoelektryczne pozwala konwertować napięcie na ruch

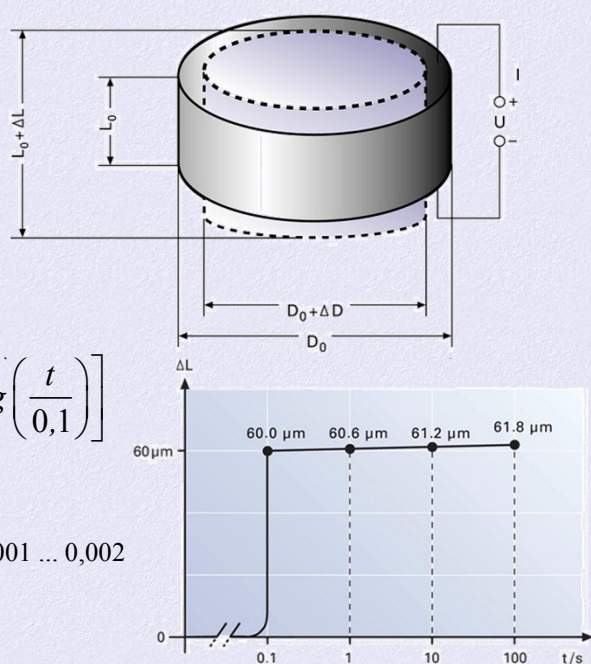


$$\Delta L \approx \pm E d_{ij} L_0$$

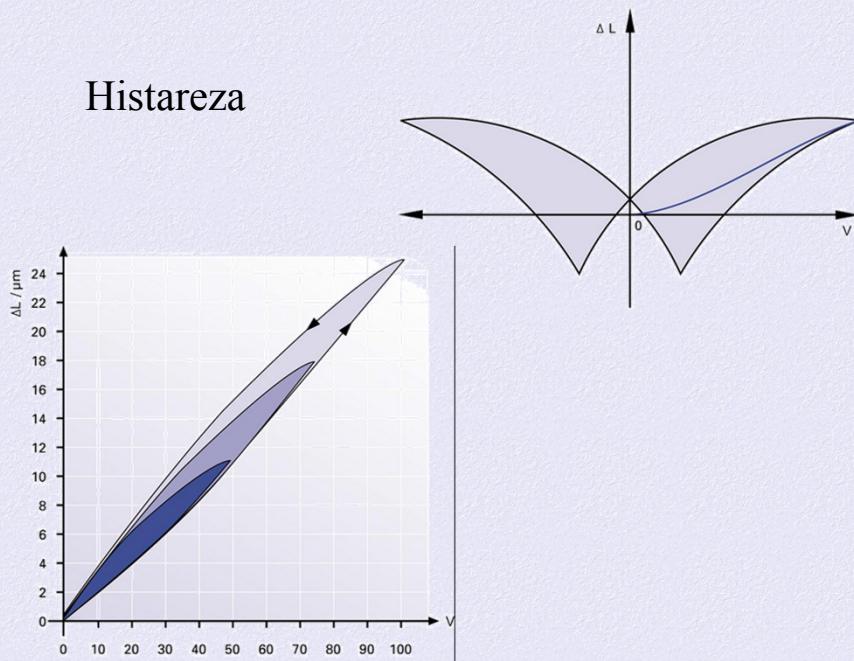
Zjawisko pełzania

$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{t=0,1} \left[1 + \gamma \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \right]$$

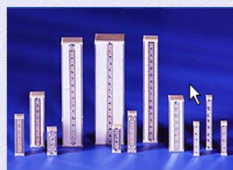
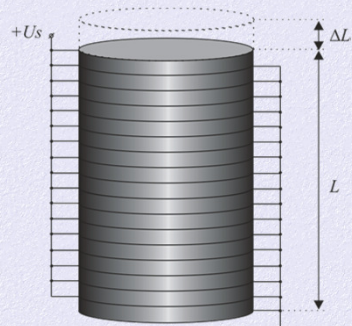
γ wsp. pełzania - rzędu 0,001 ... 0,002



Histareza



Stosy piezoelektryczne



$$C \approx \frac{n\epsilon_{33T}A}{d}$$

$n=L/d$ – liczba warstw
 ϵ_{33T} – przenikalność elektryczna
 przy stałym naprężeniu
 A – powierzchnia elektrod
 d – grubość warstwy

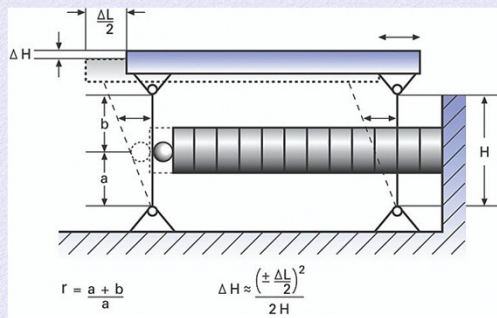
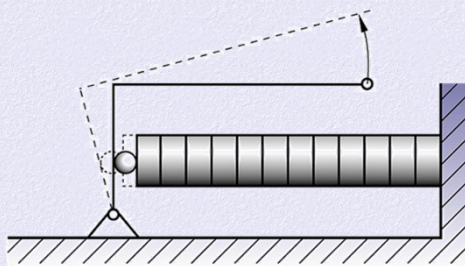
$$i_{sr} \approx fCU_{pp} \quad i_{\max} \approx \pi fCU_{pp}$$

$$f_{\max} \approx \frac{i_{\max}}{2CU_{pp}}$$

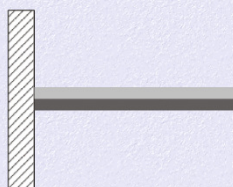
$$P_{sr} \approx CU_{\max}U_{pp}f \quad P_{\max} \approx \pi CU_{\max}U_{pp}f$$

$$P_{\text{JOULE'a}} \approx \frac{\pi}{4} \tan \delta fCU_{pp}^2$$

Metody zwiększania zakresu ruchu



Bimorfy



Przemieszczenie końcówki bimorfu opisuje zależność $\Delta L \approx \frac{3}{4} \left(\frac{l}{g} \right)^2 d_{31} E$

l – długość bimorfu, g – grubość jednego piezoelektryka, d_{31} – składową tensora podatności piezoelektrycznej (modułem piezoelektrycznym), E amplitudą pola elektrycznego

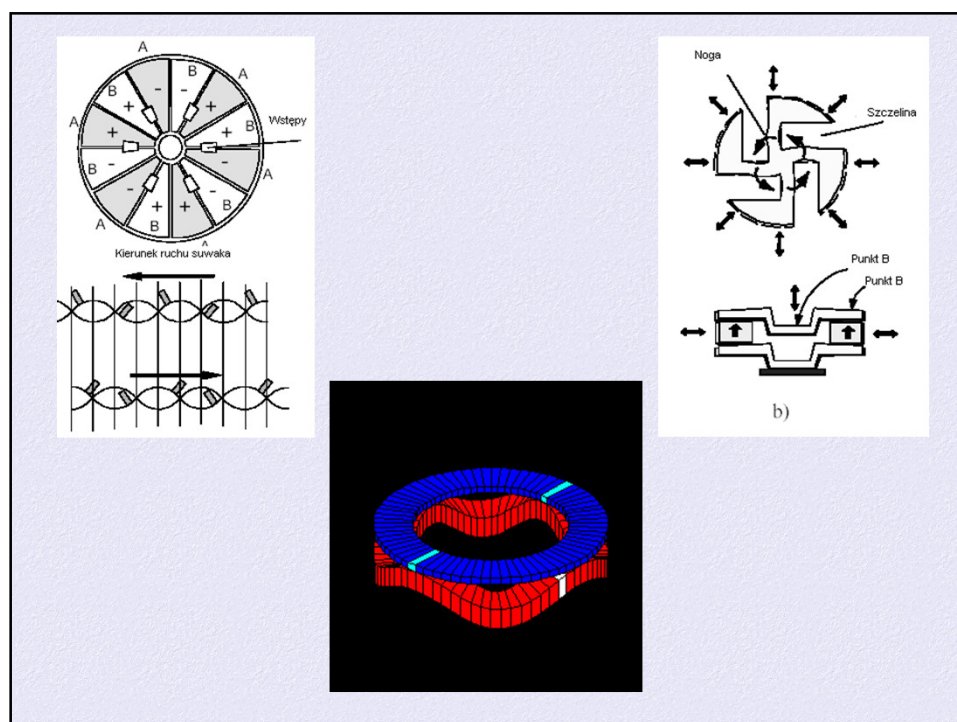
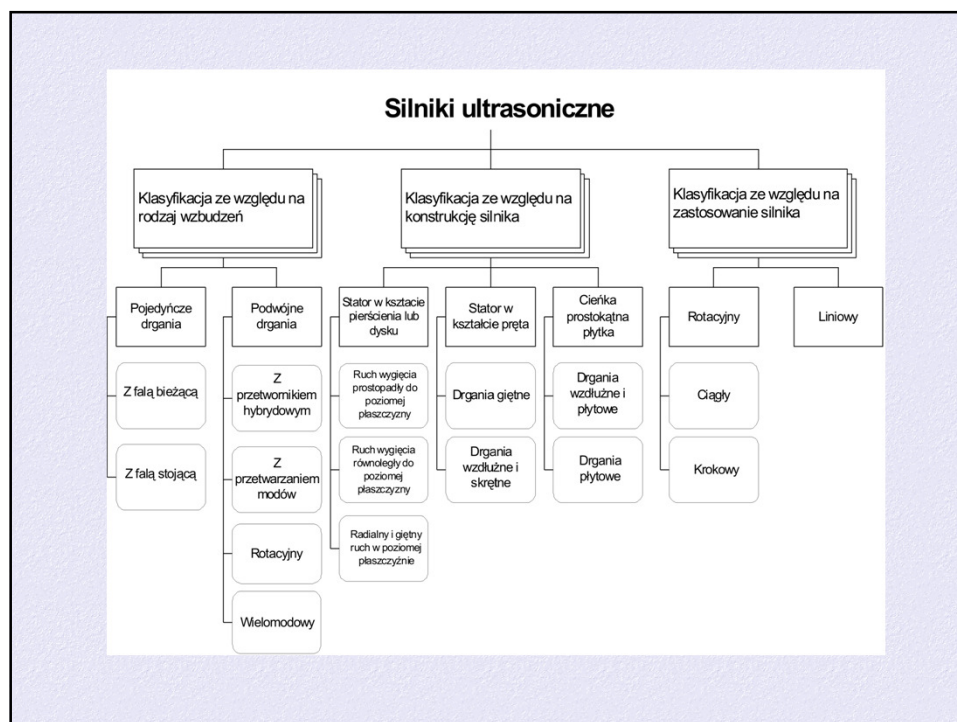
Generowana siła

$$F = \frac{2ga}{l} \frac{d_{31}}{\epsilon_{11}^E} E$$

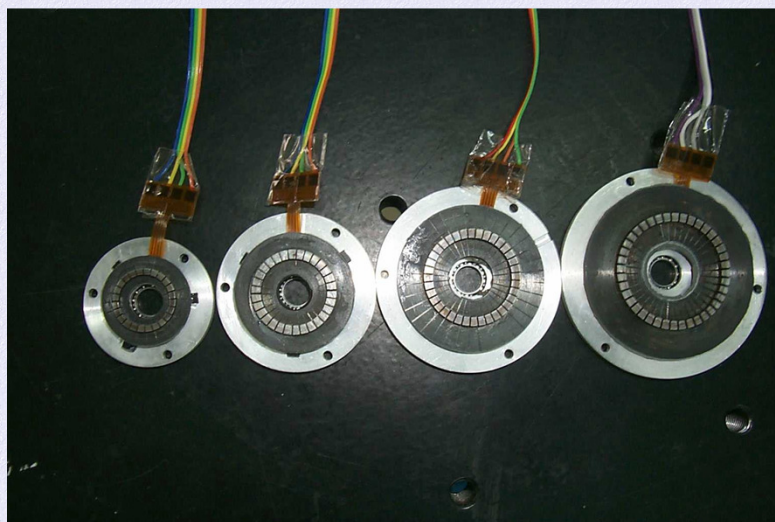
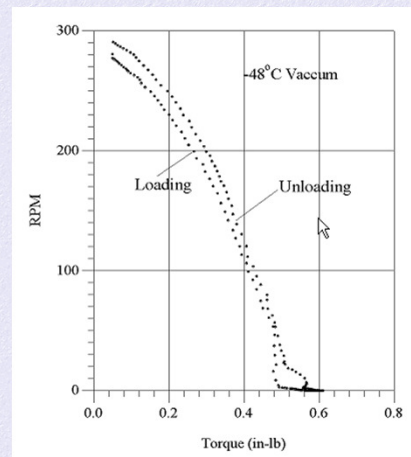
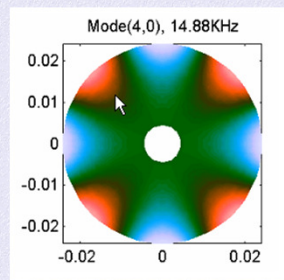
a – szerokość bimorfu

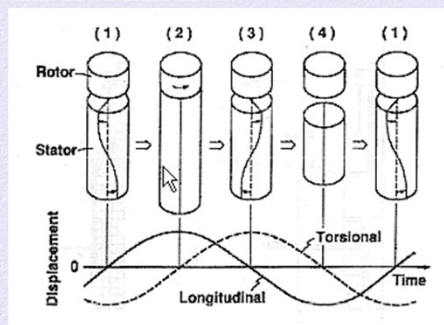
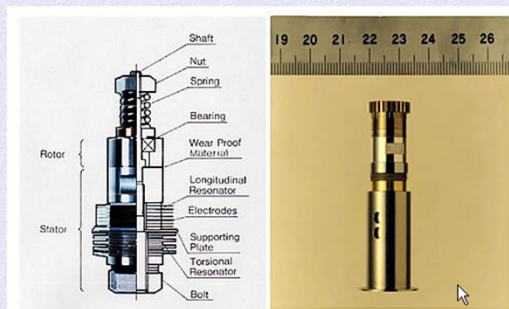
częstotliwość rezonansowa

$$f_0 \approx 0,161 \frac{2g}{l^2} \sqrt{\frac{1}{\rho \epsilon_{11}^E}}$$

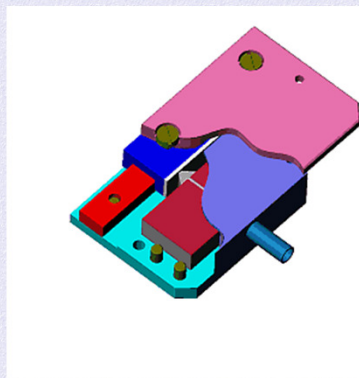
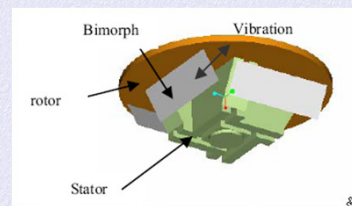
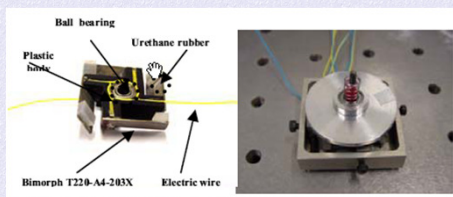
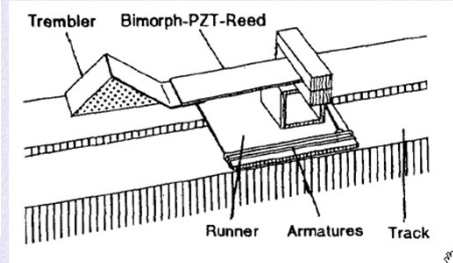
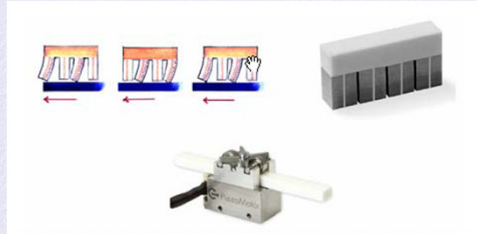


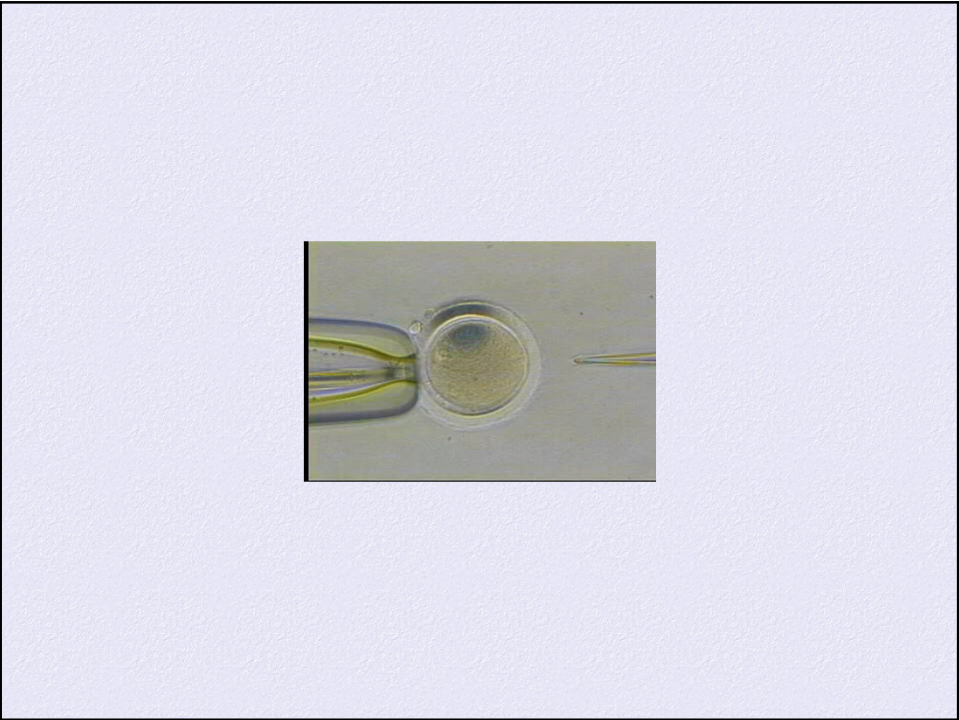
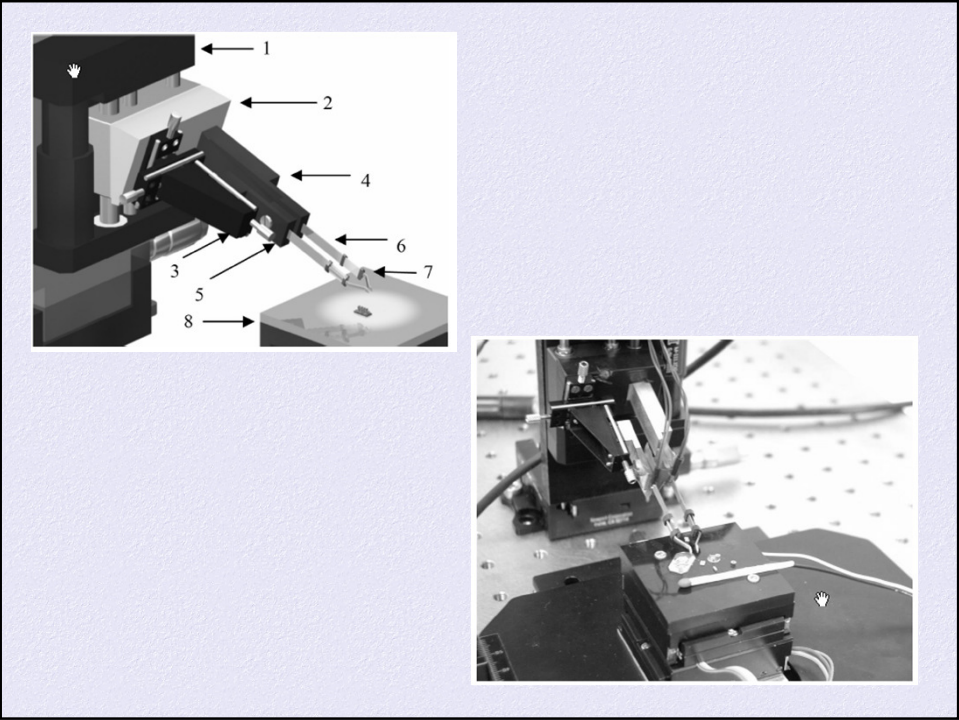
Mode (m,n)	Calculated Frequency (KHz)	Measured Frequency
(4,0)	14.88	14.55
(5,0)	22.48	22.37
(6,0)	31.45	31.34



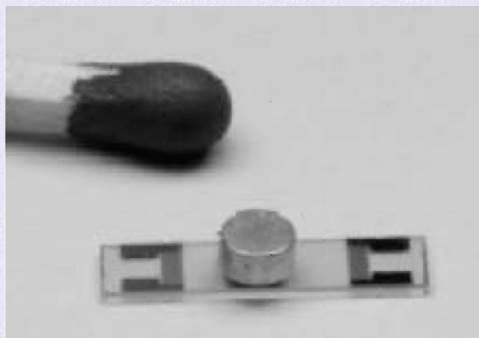
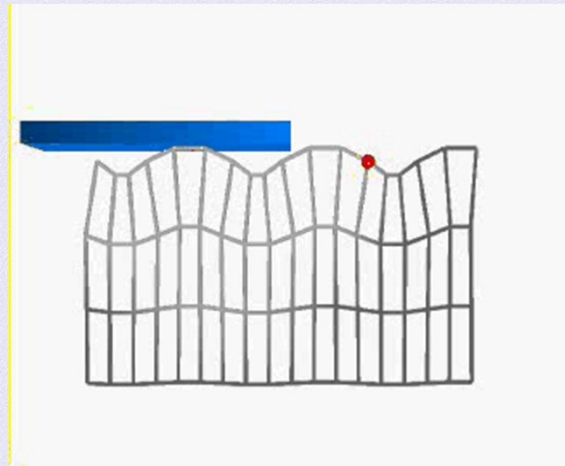


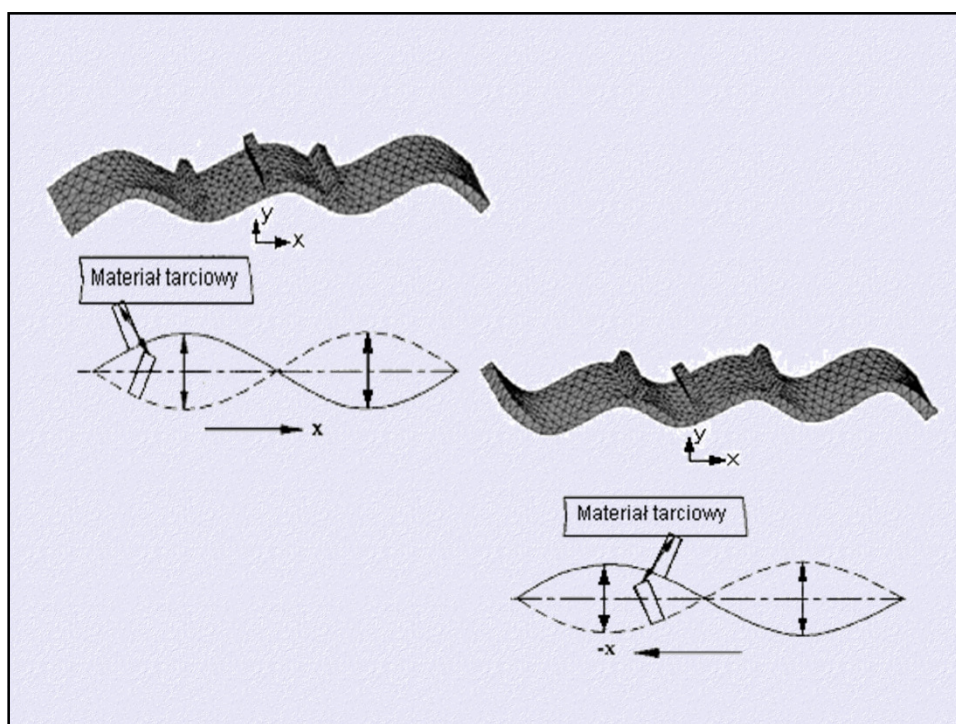
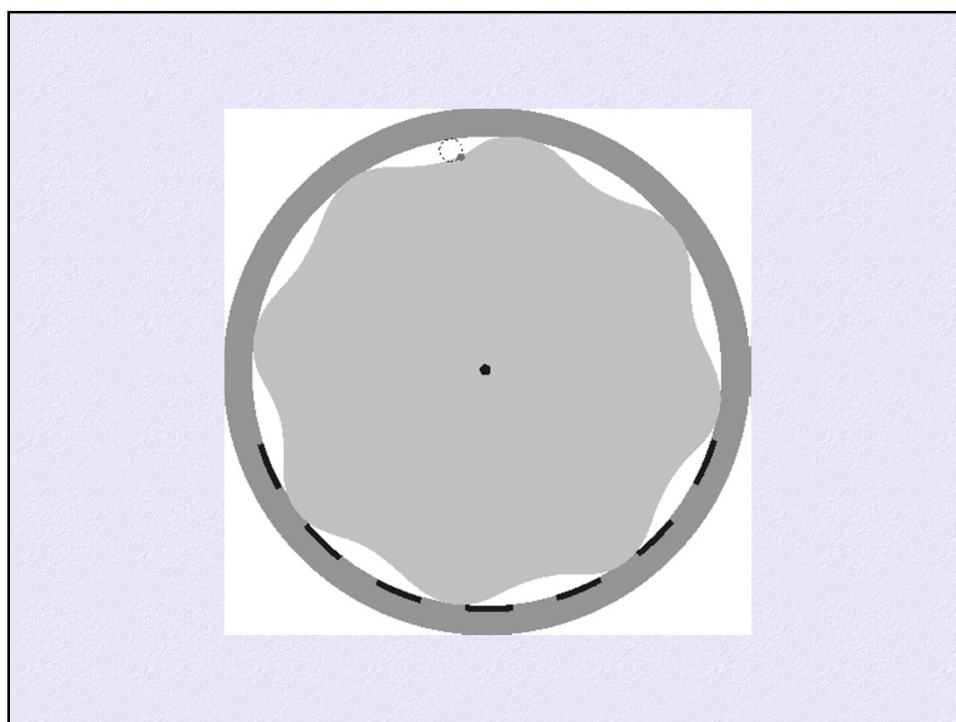
Silniki napędzane bimorfami





Silnik z falą Rayleigha





Najprostszy model

założenia:

- rozmiar kontaktów suwaka z podłożem jest dużo mniejszy niż długość fali Rayleigha
- deformacje fali Rayleigha spowodowane obciążeniem powierzchni przez suwak są niewielkie i nie wpływają na siebie
- deformacje są równomiernie rozłożone wzdłuż suwaka

W czasie jednego cyklu fali Rayleigha $-\frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}$ wibracje w kierunku normalnym do powierzchni można w uproszczeniu opisać wyrażeniem:

$$y = A_y \sin \omega t$$

Suwak będzie poddawany działaniu siły normalnej (docisk) $F_n = c_y A_y (\sin \omega t - \sin \varphi)$ na odcinku styku styku pomiędzy

$$\omega t = \varphi, \left(-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \right), \quad \text{a} \quad \omega t = \pi - \varphi$$

c_y jest współczynnikiem zależnym od sztywności podłoża

Analogicznie wzdłuż powierzchni:

$$x = A_x \cos \omega t$$

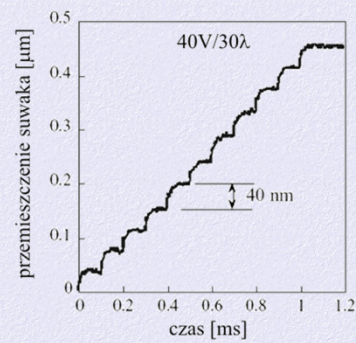
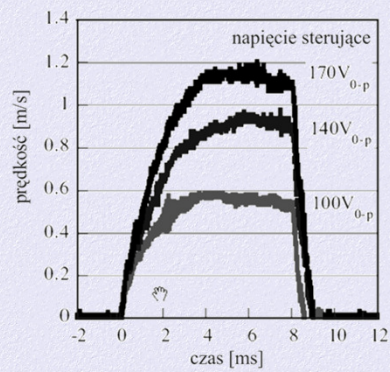
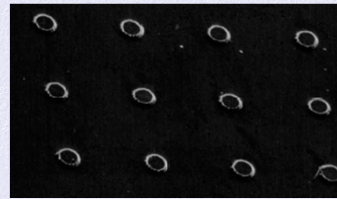
$$F_w = c_x A_x (\cos \omega t - \cos \varphi)$$

Siła działająca na suwak będzie proporcjonalna do deformacji wzdłuż powierzchni w punktach kontaktu, stąd:

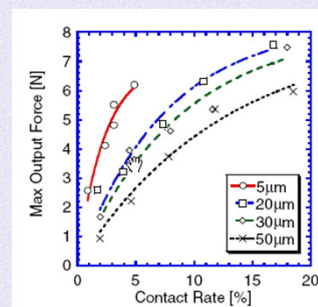
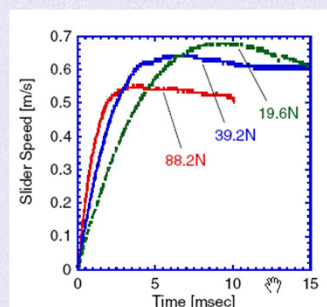
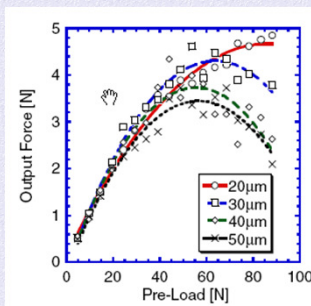
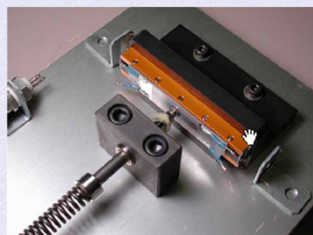
$$F = c_x A_x \left[\cos \varphi - \cos \omega t - (\omega t - \varphi) \sin \frac{v}{A_y \omega} \right]$$

Zależność ta obowiązuje dla dostatecznie dużego współczynnika tarcia (suwak przesuwa się bez znaczącego poślizgu).

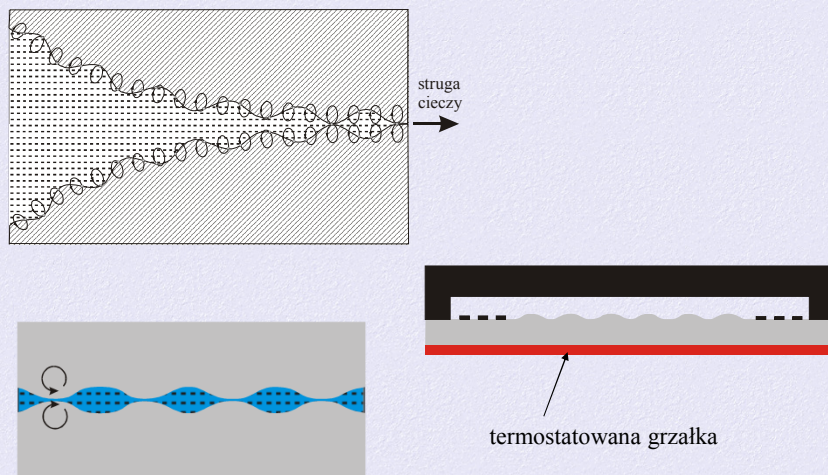
$f = 10 \text{ MHz}$
 $F_{\text{docisku}} = 30 \text{ N}$
 $F_{\text{wy}} = 3 \text{ N}$
 $a = 1000 \text{ m/s}^2$
 podłoże $128Y \text{ LiNbO}_3 - 60 \times 15 \text{ mm}$
 suwak krzemowy $4 \times 4 \text{ mm}$



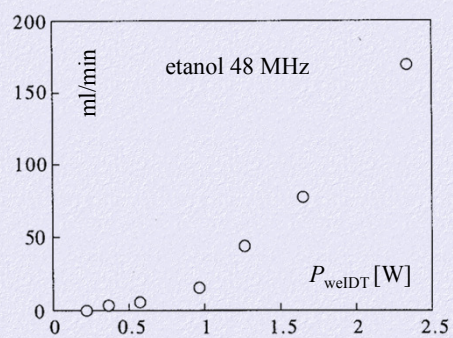
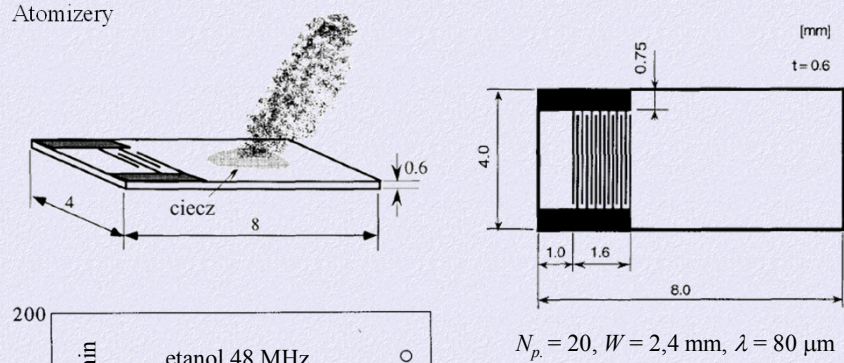
$U_s = 125 V_{0-p}$, $S = 1,2 \text{ mm}^2$



Mikropompy mikrodysze przepływomierze

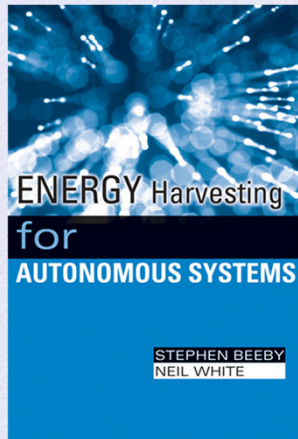


Atomizery

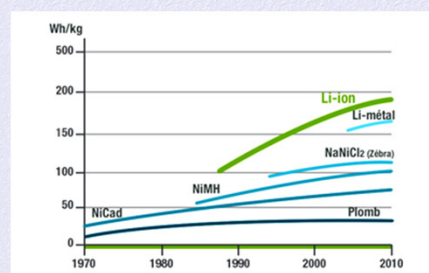
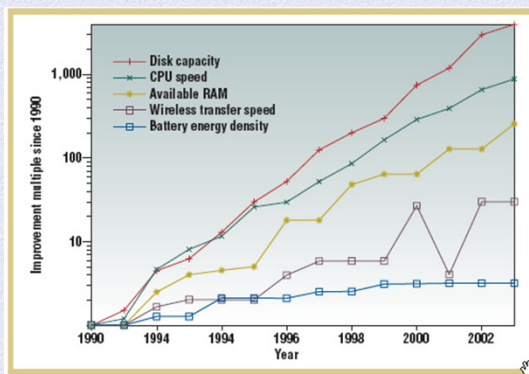


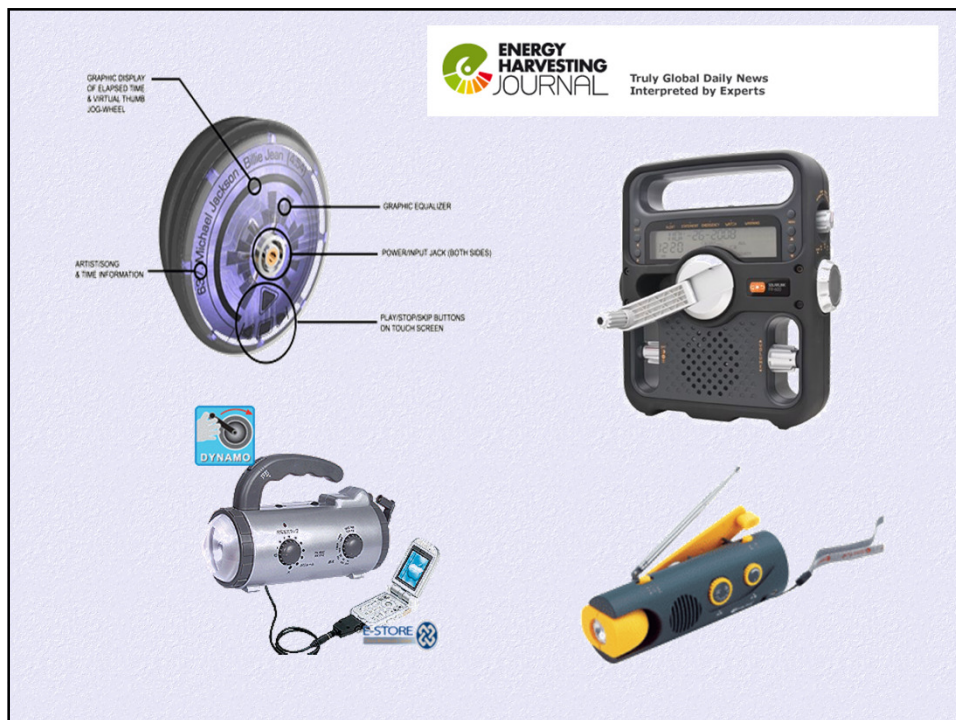
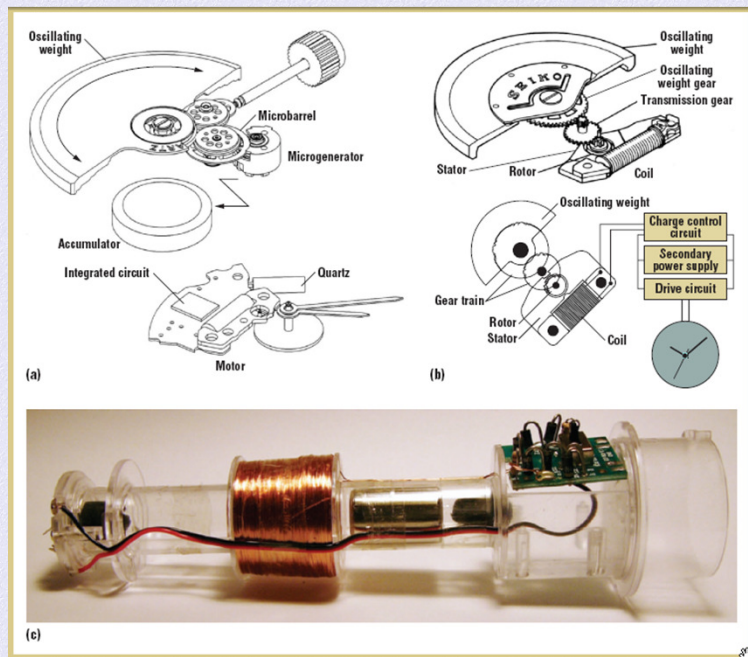
$$d \sim \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}$$

Samozasilająca się elektronika



Selfpowered electronics
Energy harvesting





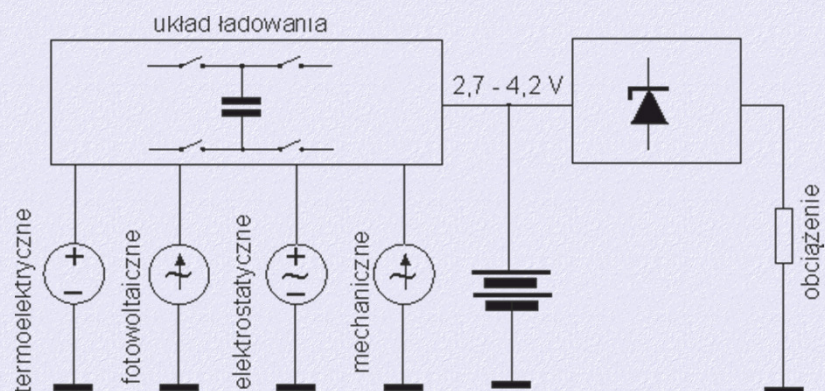
Maksimum możliwości

Światło 15 mW/cm^2
wewnątrz pomieszczeń $10 \mu\text{W/cm}^2$

Energia termiczna $15 \mu\text{W/cm}^2$ ew. cm^3
przy gradiencie $10 \text{ }^\circ\text{C}$

Energia mechaniczna drgań
przetworniki piezoelektryczne $200 \mu\text{W/cm}^3$
przetworniki elektrostatyczne $100 \mu\text{W/cm}^2$
przetworniki elektromagnetyczne $1 \mu\text{W/cm}^3$

Przechwytywanie energii z otoczenia (energy harvesting)



Moc

Liczba ładunków na jednostkę powierzchni:

$$D_3 = \epsilon \epsilon_0 E_3 + Y d_{31} S_1$$

Po scałkowaniu po grubości (S_1 , D_3 i $d_{31} = \text{const}$) otrzymamy:

$$D_3 h = \epsilon \epsilon_0 U + Y d_{31} S_1 h$$

Zakładając, że D_3 , V , S są jednakowo zmienne oraz $\epsilon \epsilon_0 \approx \epsilon$ prąd wyniesie

$$-i = j\omega A \left(\epsilon \frac{U}{h} + Y d_{31} S_1 \right)$$

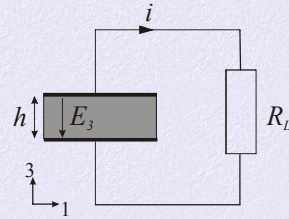
Z prawa Ohma:

$$U = \frac{-Y d_{31} A S_1 j\omega}{\frac{1}{R} - j\omega C} \quad C = \frac{\epsilon A}{h}$$

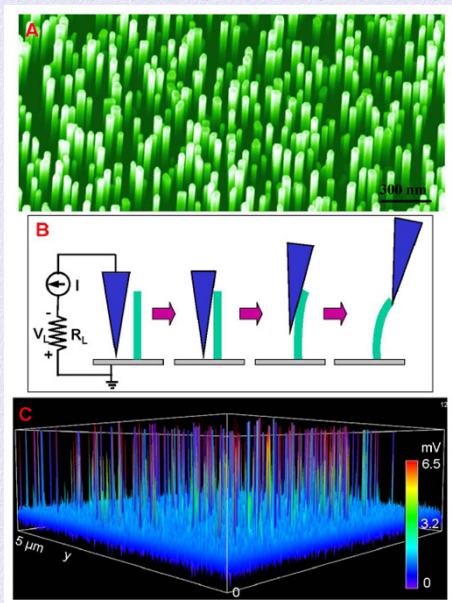
Z tego:

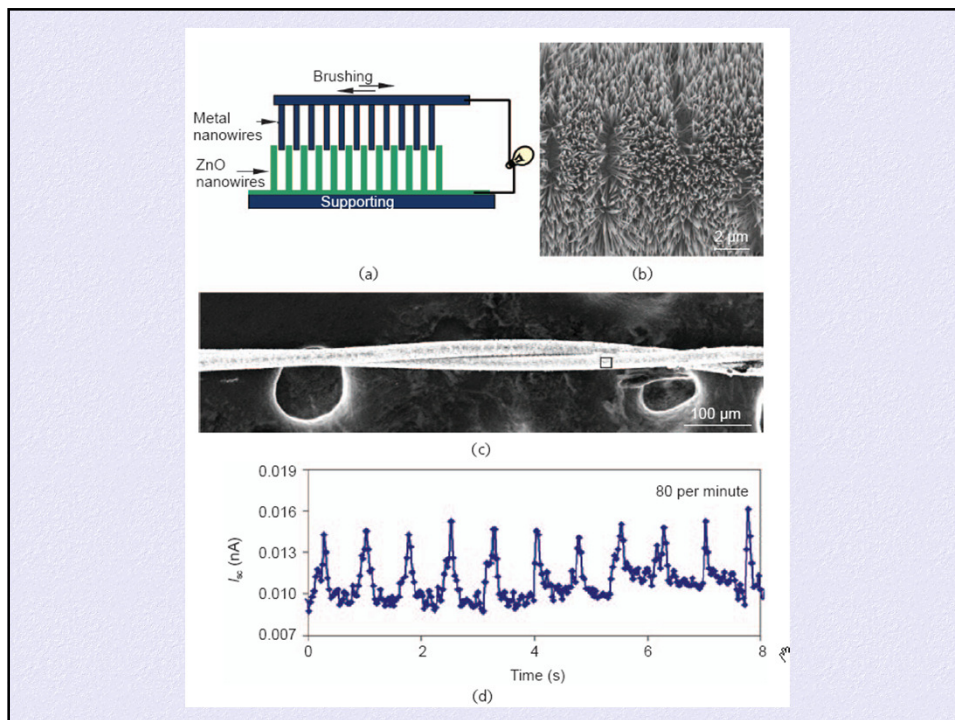
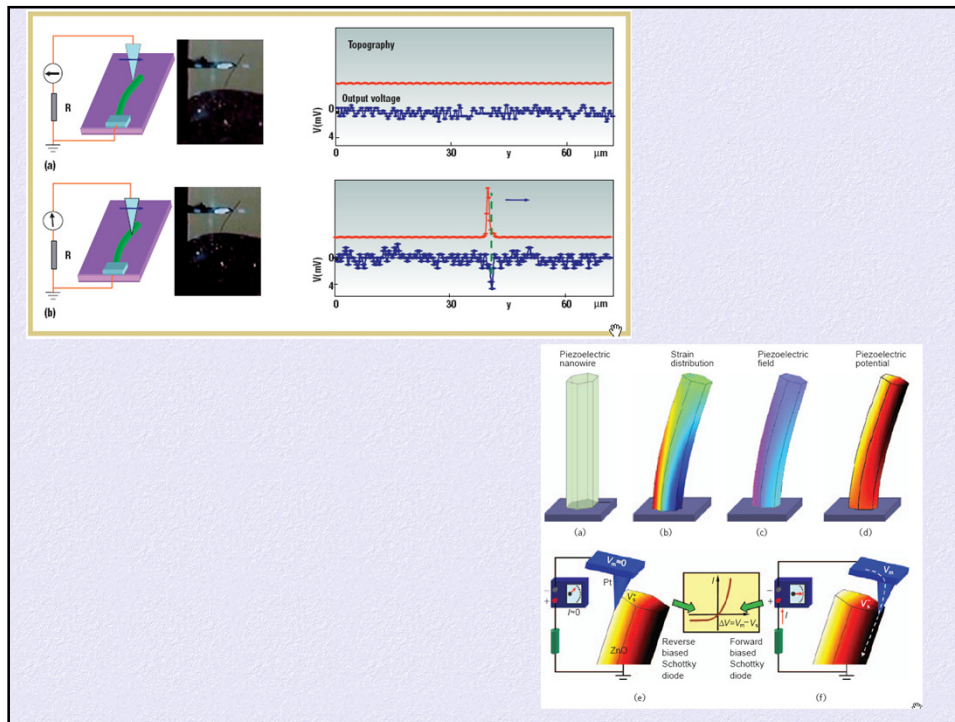
$$|U| = \frac{Y d_{31} A S_1 \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \quad P_p = \frac{|U|^2}{R} = \frac{(Y d_{31} A S_1 \omega)^2 R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

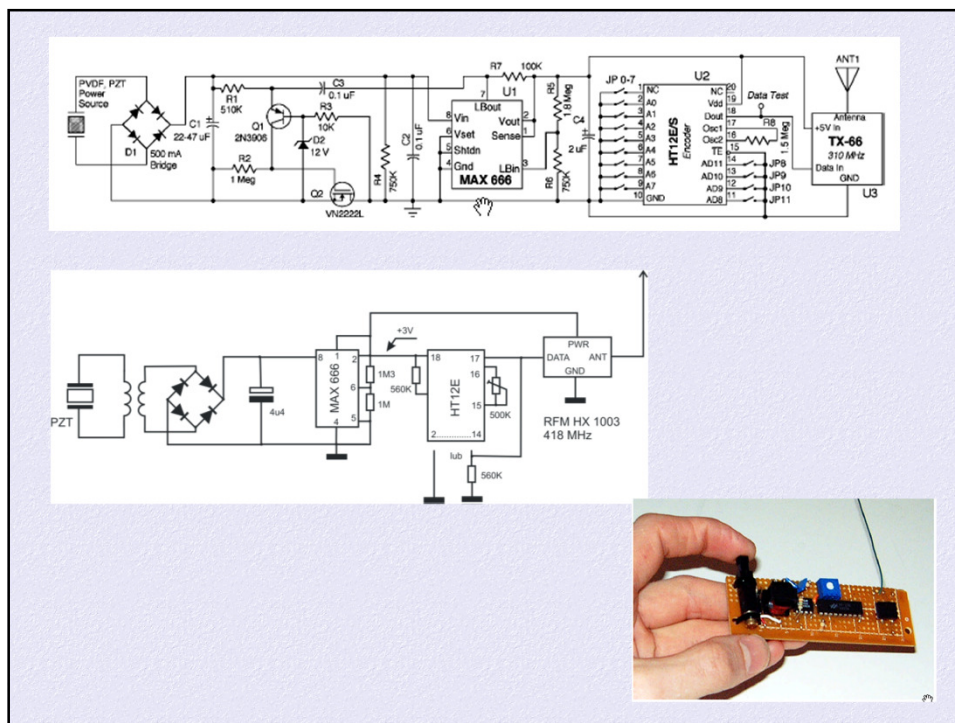
~ pojedyncze mW



Nanopręty ZnO

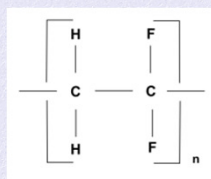


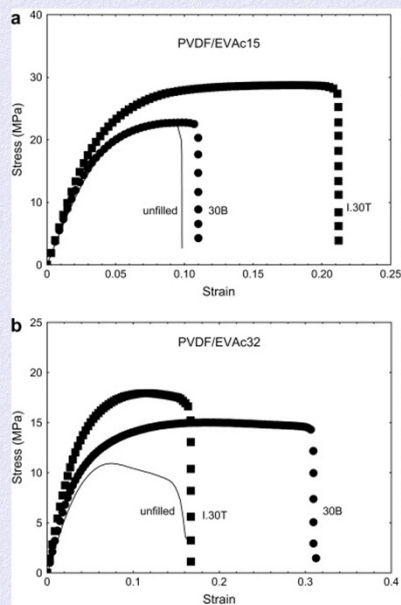
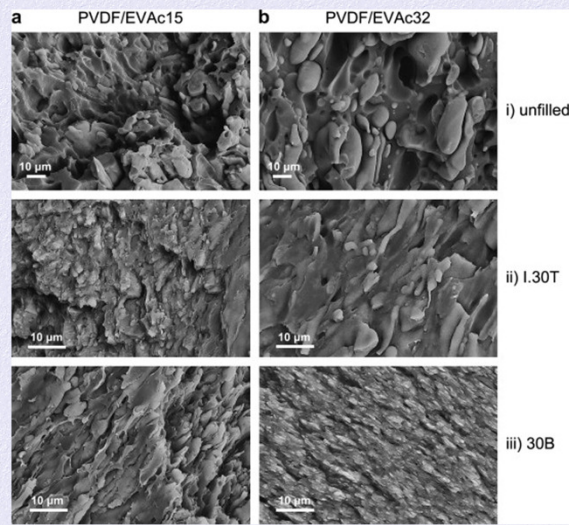




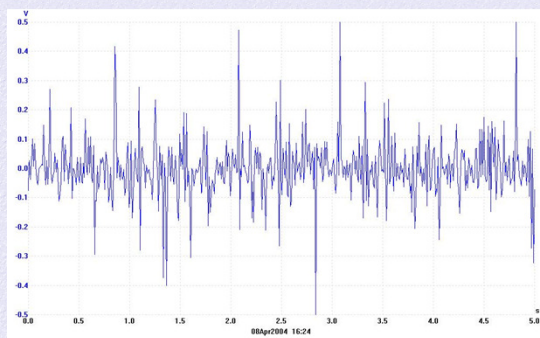
Polifluorek winylidenu (PVDF - Polyvinylidene fluoride)
 polimer fluorowy o wysokim stopniu krystalizacji
 należy do grupy ciągliwie-sprężystych, termoplastycznych tworzyw fluorowych
 biały lub czarny (z 8% dodatkiem włókien węglowych lub sadzy przewodzi prąd)

dobre własności cieplne i elektryczne
 wysoka wytrzymałość mechaniczna - wytrzymałość na ściskanie
 wysoka dopuszczalna temperatura pracy (150°C)
 zwiększona odporność na ścieranie
 wysoka odporność chemiczna
 obojętność fizjologiczna
 niska palność
 wyjątkowa odporność na działanie UV oraz czynników atmosferycznych
 dobra skrawalność oraz sprężystość zwrotna

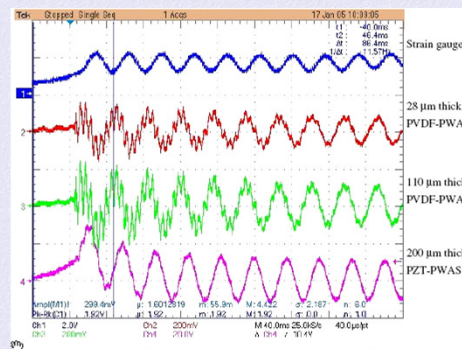




Property	Units	PVDF	PZT
Density	$\frac{g}{cm^3}$	1.78	7.6
Relative permittivity	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	12	1,700
Elastic modulus	$\frac{10^{10} N}{m}$	0.3	4.9
Piezoelectric constant	$\frac{10^{-12} C}{N}$	$d_{31}=20$ $d_{33}=30$	$d_{31}=180$ $d_{33}=360$
Coupling constant	$\frac{C \cdot V}{N \cdot m}$	0.11	$k_{31}=0.35$ $k_{33}=0.69$



Pasek PVDF 12x2 cm na wietrze



Deformacja folii

$$x = \frac{y}{R} \quad y - \text{odległość od ustalonej płaszczyzny}$$

$$R = \frac{L^3}{3(L-l)\delta z}$$

l - odległość od przymocowanego końca do końca swobodnego

L - całkowita długość

δz - wychylenie

$$x(l) = \frac{3}{4} \frac{H}{L^3} (L-l)\delta z$$

H - grubość folii

Indukowane pole elektryczne

$$E_3 = \frac{x(l)}{d_{31}}$$

Ładunek indukowany w odległości l

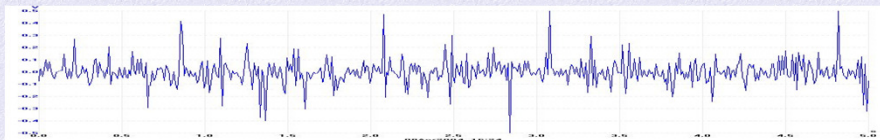
$$Q_{dl} = \varepsilon_3 E_3(l) w \cdot dl$$

Ładunek całkowity

$$Q_{tot} = \int_0^L Q_{dl} dl$$

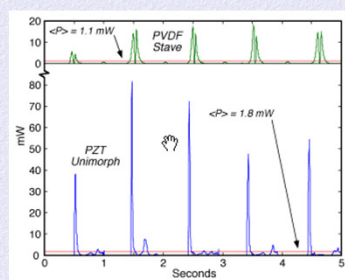
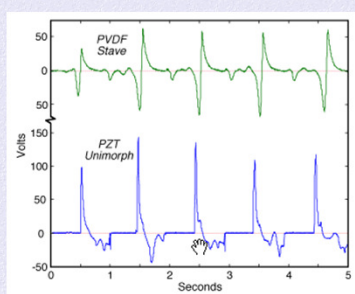
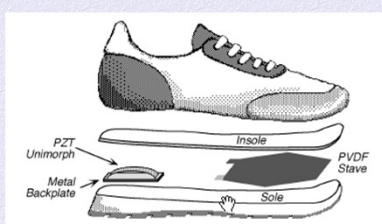
Generowane napięcie

$$V = \frac{Q_{Tot}}{C} = \frac{\varepsilon_3 \cdot h_{31} \cdot w \cdot \int_0^L x_1(l) dl}{C} = \frac{3}{8} \left(\frac{H}{L} \right)^2 h_{31} \delta z$$

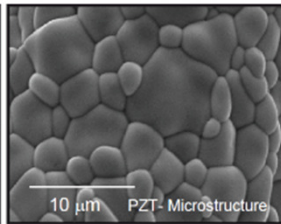
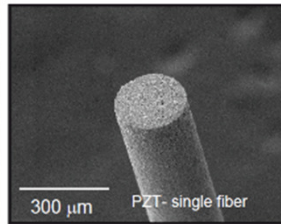


Przemieszczenie [cm]	Promień krzywizny [m]	Naprężenie znorm. [·10 ⁻⁵]	Napięcie zmierzone [mV]	Napięcie obliczone (mV)
0,0	∞	0	~20	0
0,5	1,92	0,521	64	55,4
1,0	0,96	1,04	80	110,81
1,5	0,64	1,56	106	166,21
2,0	0,48	2,08	163	221,61
2,5	0,384	2,60	202	277,02
3,0	0,32	3,13	232	332,42
19,8	0,048	20,7	-	2200

Rezystancja obciążenia [k Ω]	Amplituda napięcia [mV]	Moc [nW]
10	35,1	123
100	91,7	84
1 000	301	91

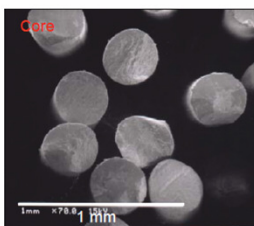
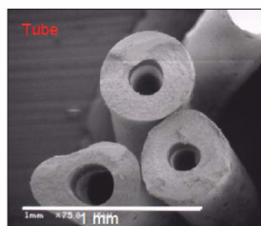
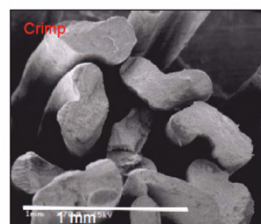
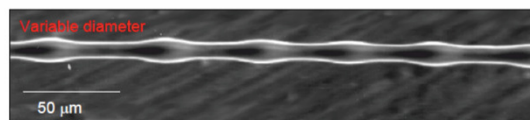


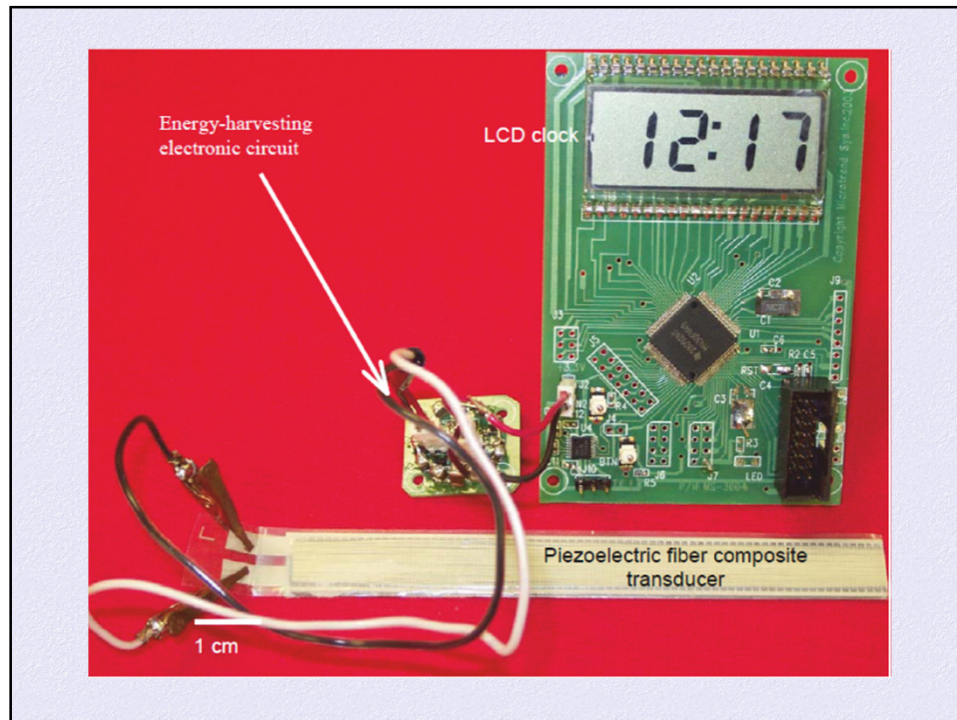
Włókna PZT



PROPERTIES	PZT-8 (Hard)	PZT-5A (Soft)	PZT-5H (Soft)
Density	7.5	7.5	7.45
Young's Modulus ($\times 10^{10}$ N/m ²)	9.3	6.6	6.4
Curie Temperature (°C)	300	350	190
Mechanical Q	900	100	65
Dielectric Constant (1 kHz)	1100	1725	3450
Dissipation Factor (1 kHz)	0.3	2.0	2.0
k_{31}	0.33	0.36	0.38
k_p	0.56	0.62	0.64
k_{33}	0.66	0.72	0.75
k_{15}	0.59	0.69	0.68
d_{31} ($\times 10^{-12}$ m/V)	-107	-173	-262
d_{33} ($\times 10^{-12}$ m/V)	241	380	583
d_{15} ($\times 10^{-12}$ m/V)	382	582	730
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	-10.9	-11.5	-8.6
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	24.8	25.0	19.1
g_{15} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	28.7	38.2	28.9
ϵ_{11}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	10.8	15.2	15.6
ϵ_{12}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	-3.6	-5.3	-4.7
ϵ_{33}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	13.7	18.3	19.8

CERAMIC FIBERS WITH VARIOUS CROSS-SECTIONS





Group	Transducer	Dimen. (cm)	Measure method	Mode	V_{max} (V)	Peak Power (mW)	Stored energy in 13 s (mJ)
Kyushu NIRI, Japan	PZT-5A disk	D=2.4 T=0.3	Ball drop	d_{33}	120	0.45	NA
MIT	Multilayer bimorph PVDF	8×10	walking	d_{33} & d_{31}	60	20	17
MIT/ NASA	Thunder	7×9.5 ×0.05	walking	d_{31} & d_{15}	150	80	110
Ocean Power Tech., Inc.	EEL PVDF	Five 132×15 ×0.04	Ocean waves	d_{33} & d_{15}	3	—	NA
Univ. of Pittsburgh	PZT-5A plate	1×1× 0.0009	Tension	d_{31}		0.0023	0.3
Penn State University	Quickpack	5×3.8× 0.07	Vibration	d_{33}	43	—	169
ACI	AFCB	13×1 ×0.1	Vibration (25 Hz)	d_{33}	400	120	880

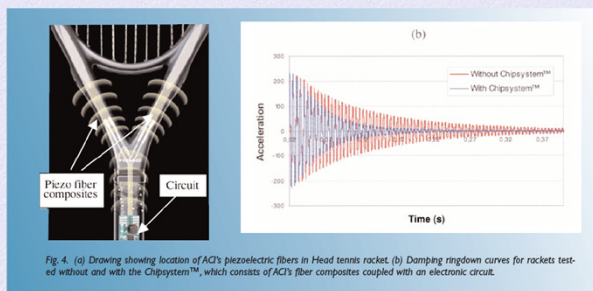
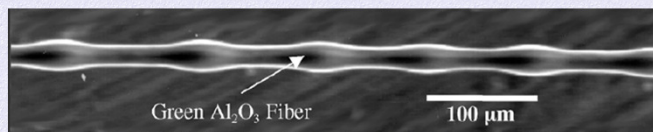


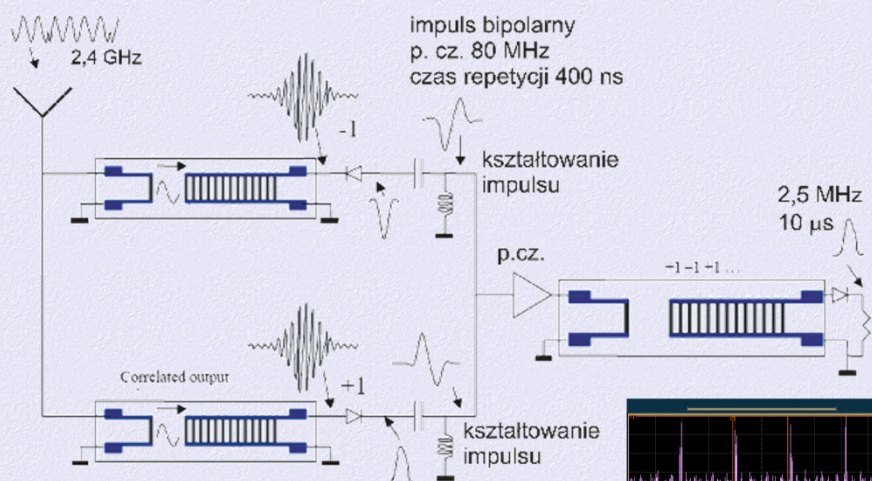
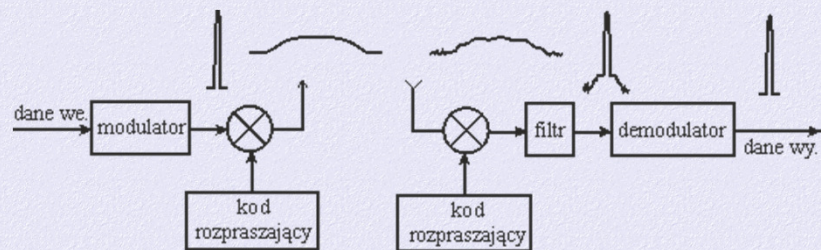
Fig. 3. Andre Agassi with ACI/Head smart tennis racket.

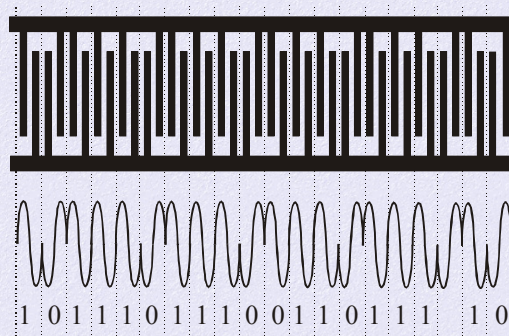


Fig. 5. ACI/Head smart ski.

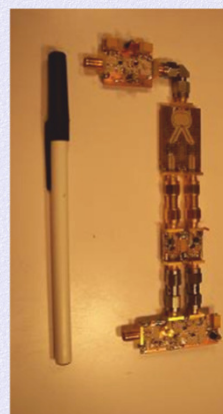
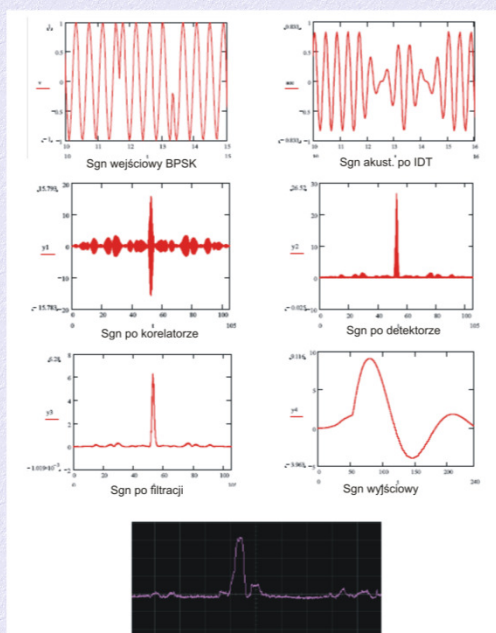
Specjalne układy akustyczne

Zero power radio (odbiornik korelacyjny)

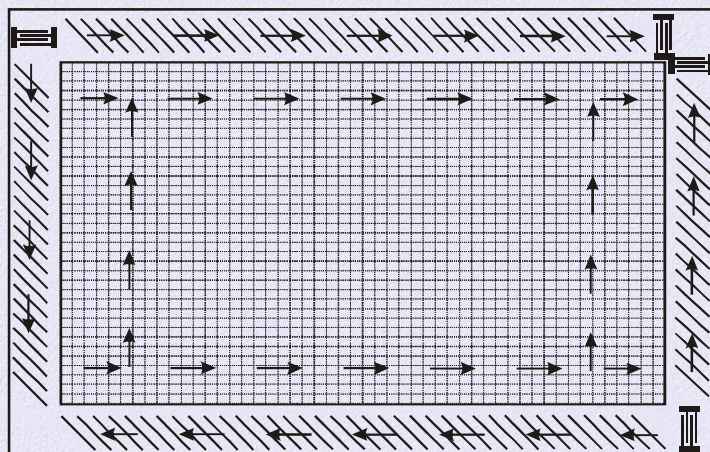




konfiguracja	Sgn. we	straty AFP	straty detektora	U_{wy}	szum (RMS)	SN
13 elem. AFP z diodą	+7 dBm - 6 dBm	-14 dB -14 dB	-27 dB -50 dB	7 mV 0,1 mV	< 10 mV < 10 mV	>700 >10
13 elem. AFP z det. aktywnym 3,6 mW	+7 dBm - 10 dBm - 22 dBm	-14 dB -14 dB -14 dB	+6 dB 0 dB - 20 dB	200 mV 20 mV 0.5 mV	300 mV 300 mV 300 mV	670 67 1,33



Panele dotykowe



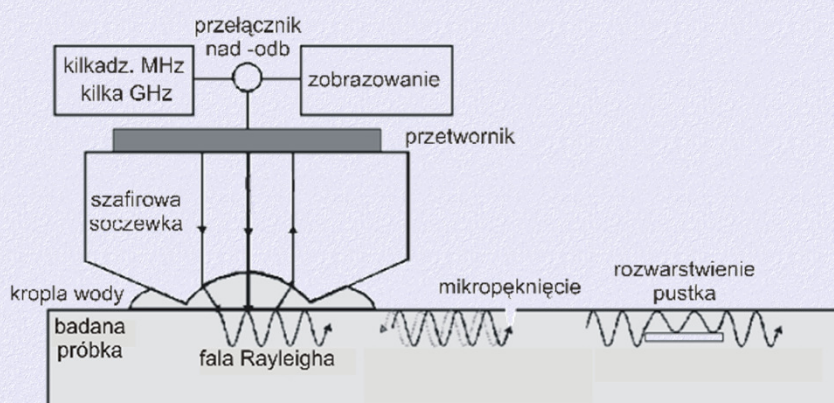
5 MHz

Cechy użytkowe

uzyskiwane przekątne 6,4" – 42" tj. ~16 – 105 [cm]
rozdzielczość 4096 x 4096
przeźroczystość >90%
dokładność < 2mm
minimalna siła uaktywniająca 55 g
aktywacja palcem, palcem w rękawiczce, rysikiem
możliwość rozpoznawania siły nacisku (3D)
nie zniekształca kolorów
gwarantowana wytrzymałość 50 mln dotknięć bez uszkodzenia
twardość powierzchni 7 w skali Mohsa
brak dryftu punktu dotknięcia
czas reakcji 16 ms
zakres temperatur pracy -20°C do +50°C
zakres temperatur przechowywania -40°C do +70°C
bardzo wysoka odporność na zakłócenia
kształt panelu: płaski, cylindryczny, sferyczny



Mikroskopia akustyczna

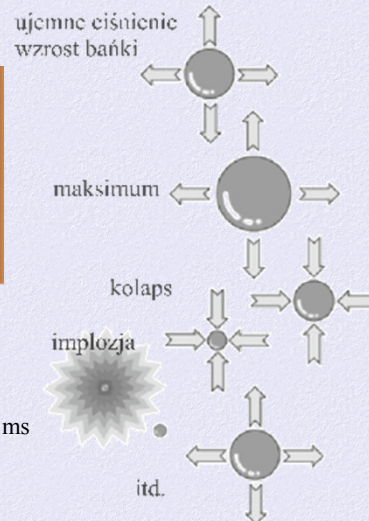


Myjki ultradźwiękowe

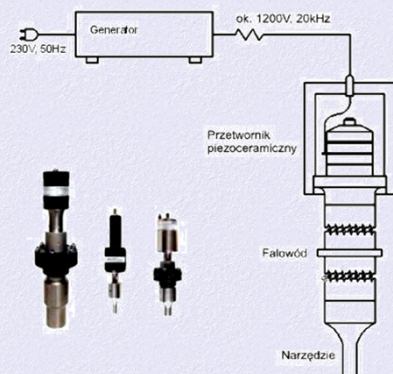


20 - 100kHz

dla 20 kHz
czas powstawania bąbla kawitacyjnego jest rzędu ms
ciśnienie 35-70 kPa
cząstki osiągają prędkość 400 km/h
co odpowiada temperaturze 5000 °C

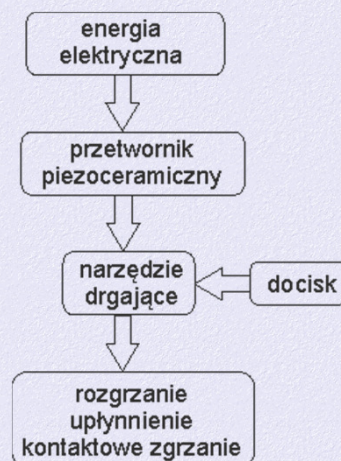


Zgrzewanie ultradźwiękowe



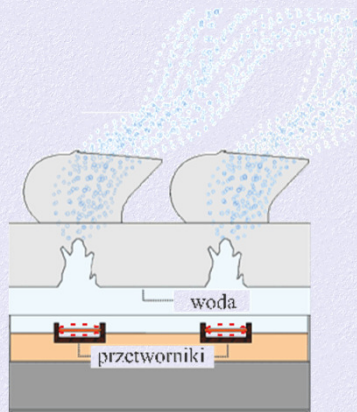
Technologie ultradźwiękowe stosowane w przemyśle:

- zgrzewanie ciągłe i punktowe,
- osadzanie i zakleszczanie,
- spęczanie,
- formowanie,
- uszczelnianie,
- cięcie (wycinanie).





Nawilzacze



pojemność ok. 150ml.

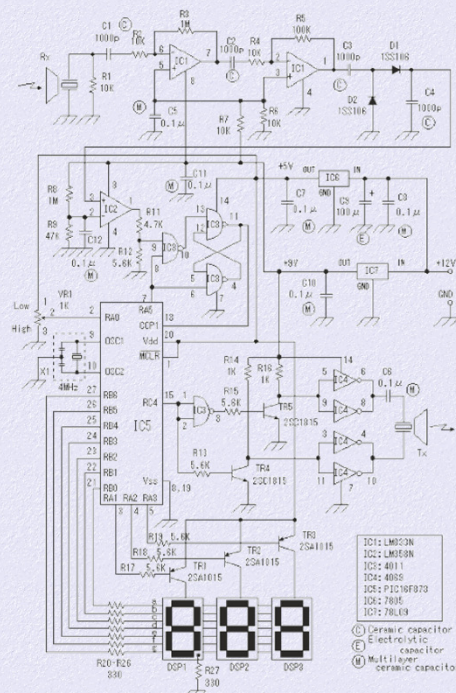
wydajność 25-5 ml/h

moc 2,5 W

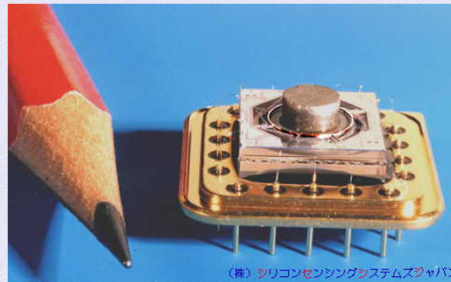
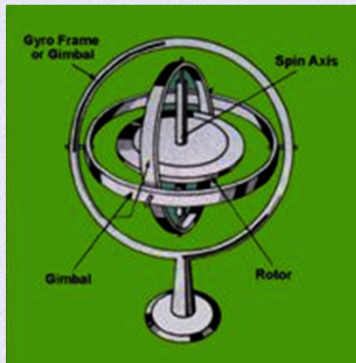
wymiary 86 x 86 x 145mm

Nawilzacze przemysłowe osiągają:
25 l/h, przepływności powietrza 8500 m³/h, 1500 W

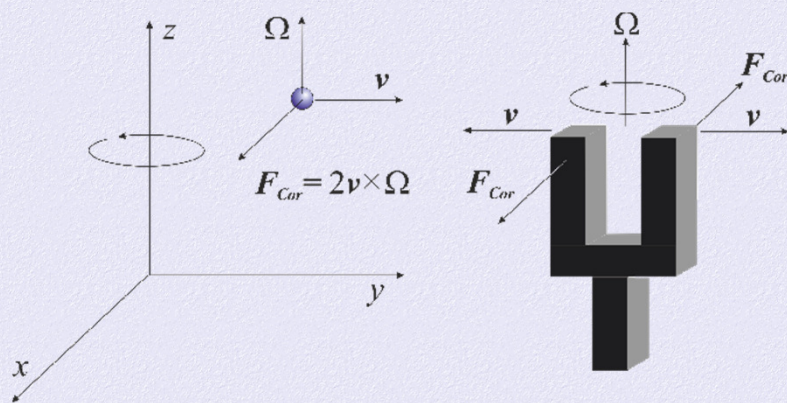
Pomiar odległości



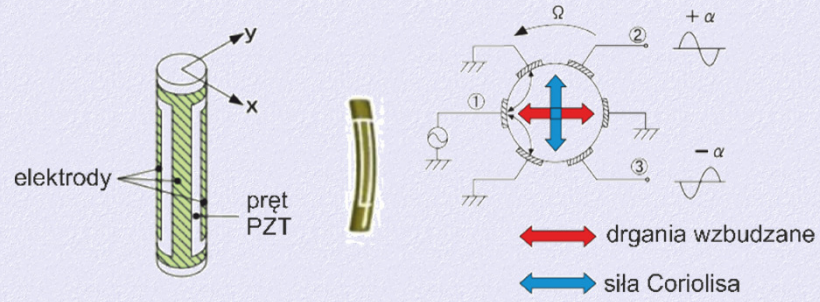
Żyroskopy



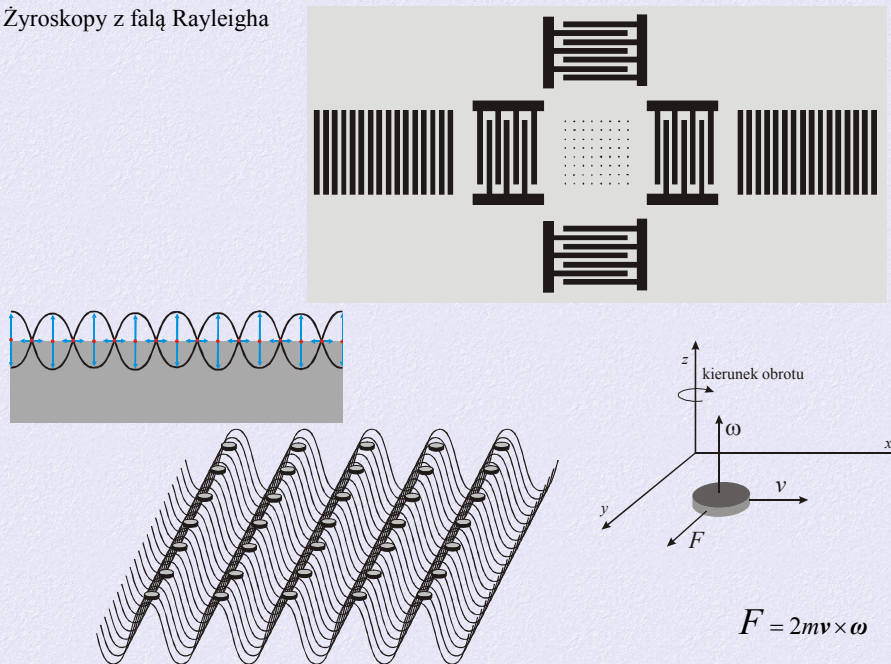
Żyroskop kamertonowy

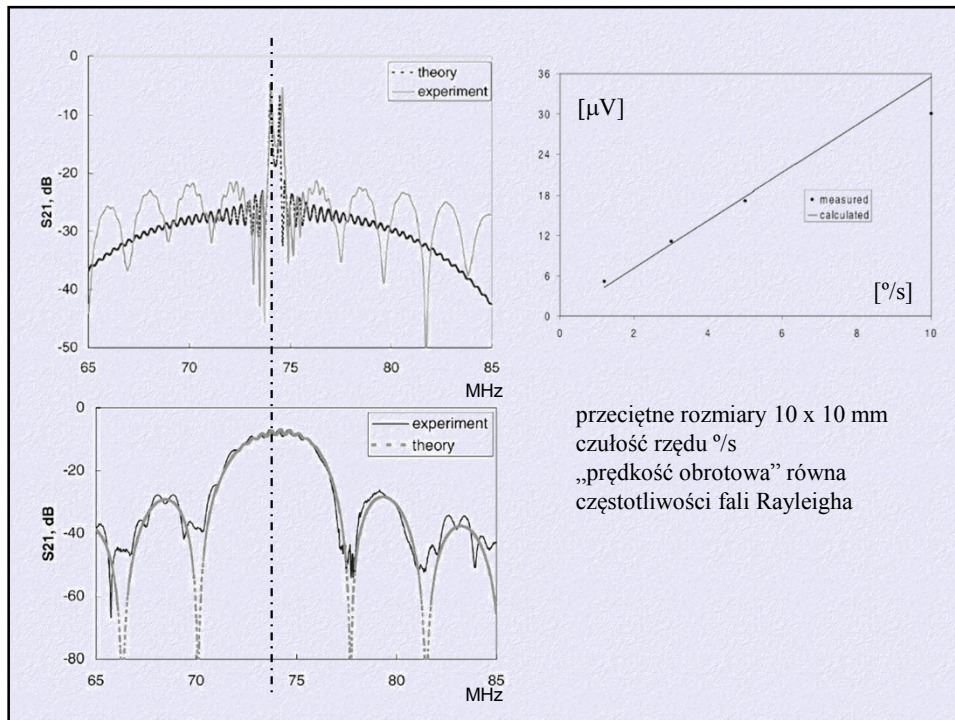


Żyroskop wałkowy



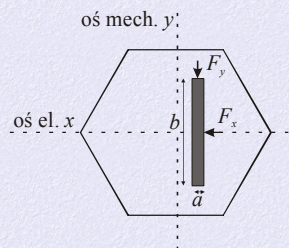
Żyroskopy z falą Rayleigha





Akcelerometri

Odształcanie materiału piezoelektrycznego powodując zmiany gęstości powierzchniowej „natychmiastowo” generuje na ściankach „elektrycznych” ładunki:



$$\frac{d\rho}{dt} = d_{ij} \frac{d\sigma}{dt}$$

Działając siłą F_x wzdłuż osi elektrycznej, na ściankach, na które działa siła generowany jest ładunek o gęstości:

$$Q = d_{ij} \sigma = d_{ij} \frac{F_x}{A_x}$$

całkowity ładunek na ścianie wyniesie:

$$Q_C = Q A_x = d_{ij} F_x$$

Napięcie powstałe na elektrodach:

$$U = \frac{Q_c}{C_k + C_m} = \frac{d_{ij} F_x}{C_k + C_m} = \frac{d_{ij} F_x}{C_s}$$

C_k – pojemność kryształu

C_m – pojemność układu pomiarowego

Miarą dobroci czujnika jest jego czułość piezoelektryczna:

$$S = \frac{dU}{dF_x} = \frac{d_{ij}}{C_k + C_m} = \frac{d_{ij}}{C_s}$$

Zastosowanie struktury kanapkowej zwiększa napięcie wyjściowe:

$$U = \frac{nQ_c}{nC_k + C_m} = \frac{nd_{ij}F_x}{nC_k + C_m}$$

Układ charakteryzuje się górną częstotliwością graniczną, która wynika z rezonansu płytki. Maksymalna czułość leży w okolicach rezonansu, natomiast przyrząd pracuje na zboczu krzywej rezonansowej poniżej f_0 .

Transmitancja operatorowa czujnika ma postać:

$$K_s = \frac{U(s)}{a(s)} = \frac{d_{ij} R_s C_s}{(1 + R_s C_s) \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\beta s}{\omega_0} + 1 \right)}$$

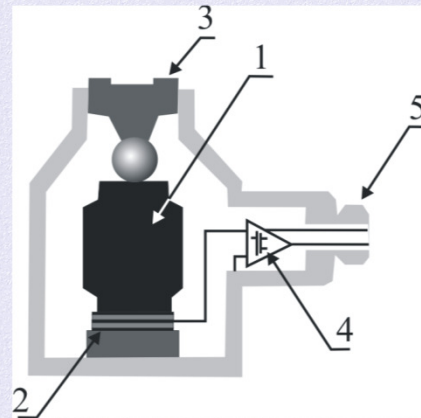
$U(s)$ – transformata Laplace'a napięcia wyjściowego

$a(s)$ – transformata Laplace'a przyspieszania

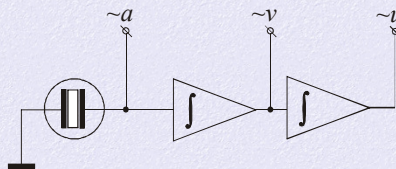
$$K_s(t) = \frac{e^{-\omega\beta t} \sinh\left(t\sqrt{\omega^2(\beta^2 - 1)}\right) \sqrt{\omega^2(\beta^2 - 1)} d_{ij} R_s C_s}{(1 + R_s C_s)(\beta^2 - 1)}$$

Przykład konstrukcji

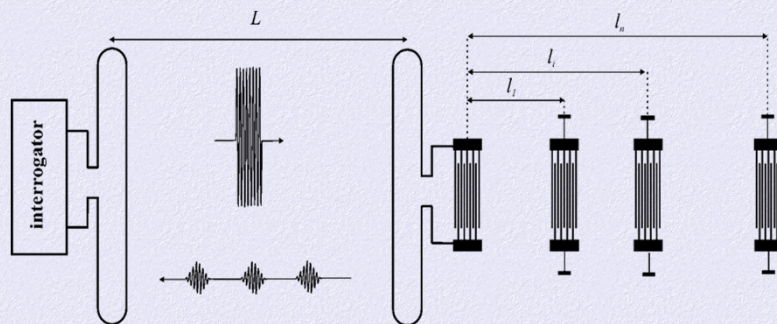
1 masa bezwładna, 2 element piezoelektryczny,
3 element realizujący naprężenie wstępne, 4
wzmacniacz ładunkowy, 5 złącze wyjściowe



Za pomocą takiego czujnika można mierzyć także prędkość i wychylenie elementu drgającego



RFID



sygnał interrogatora $S_e(x, t) = E \left(t - \frac{2\pi}{\omega_0 \lambda_0} x \right) e^{j(\omega_0 t - k_e x)}$

gdzie $E(t) = \begin{cases} E_0 & \text{dla } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{dla pozostałych} \end{cases}$

T – czas trwania paczki harmoniczej,
 λ_0 – długość fali elektromagnetycznej,
 k_e – liczba falowa fali EM,
 ω_0 pulsacja środkowa systemu (jednakowa dla
jego części elektromagnetycznej i akustycznej)

Po pokonaniu dystansu L fala EM wzbudza prąd w antenie i generuje za pomocą dołączonego doń przetwornika IDT falę akustyczną o postaci:

$$S_v(t) = S_e(t)S_{12}(t) = V(t)e^{j(\omega_0 t - k_e L)}$$

$S_{12}(t)$ element macierzy rozproszenia układu antena - IDT,
 $V(t)$ amplituda sygnału akustycznego

Sygnał po odbiciu się od układu reflektorów akustycznych trafia ponownie do IDT i zostaje przekształcony na postać EM :

$$S_{ech}(t) = S_e(t)S_{21}(t) = V_{ech}(t)e^{j[\omega_0 t - (2k_e L + 2k_a l_1 + \dots + 2k_a l_n)]}$$

$V_{ech}(t)$ amplituda sygnału ech fali EM

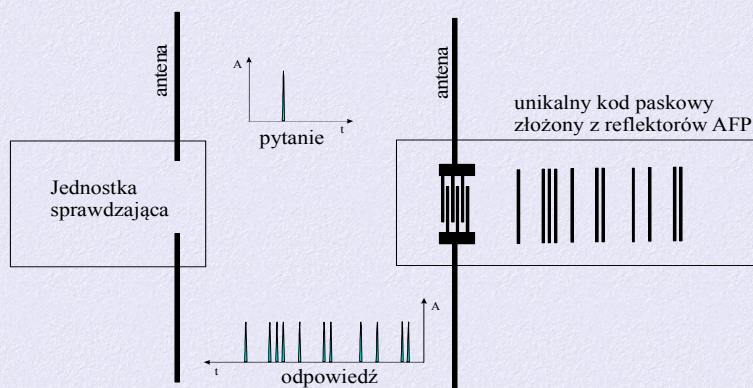
k_a liczba faliowa fali akustycznej,

$l_1 \dots l_n$ odległości reflektorów akustycznych liczone od środka IDT

Oznaczając $2k_e L = \Phi_e$ oraz $2k_a l_n = \Phi_{na}$

$$S_{ech}(t) = V_{ech}(t)e^{j\left(\omega_0 t - \Phi_e - \sum_{n=1}^m \Phi_{na}\right)}$$

m jest liczbą reflektorów



Zastosowanie n reflektorów daje możliwość rozpoznawania i rozróżniania 2^n obiektów. Maksymalna liczba reflektorów ograniczona jest amplitudą sygnału. Przy $n = 32$ otrzymuje się ponad **4 miliardy** rozróżnialnych kombinacji

Wpływając na opóźnienia fazowe pomiędzy reflektorami układ może pracować jako czujnik mierzący zmiany prędkości fali pomiędzy reflektorami.

Zależność opóźnienia fazowego fali akustycznej od zmian jej prędkości reflektorami można przedstawić następująco:

$$\Delta\Phi_{an} = \Phi_{an} \left(\frac{\Delta l_n}{l_n} - \frac{\Delta v_a}{v_a} \right) = \frac{2\omega_0 l_n}{v_a} \frac{\Delta v_a}{v_a} = \frac{2\omega_0 l_n \Delta v_a}{v_a^2}$$

$\Delta v_a = v_0 - v_a$ jest różnicą między prędkością fali akustycznej na powierzchni swobodnej, a prędkością fali akustycznej na powierzchni zaburzonej.

Z uwagi na możliwe różnice w odległościach reflektorów, czujnik taki może pracować wielorozdzielczo.

Zasięg systemu określić można stosując dobrze znane równanie radarowe

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt[4]{\frac{P_0 G_i^2 G_e^2 \lambda^4}{k T_0 B F S / N D}}$$

P_0 jest mocą wyjściową interrogatora,

G_i wzmocnieniem odbiornika interrogatora,

G_e zyskiem energetycznym anteny sensora,

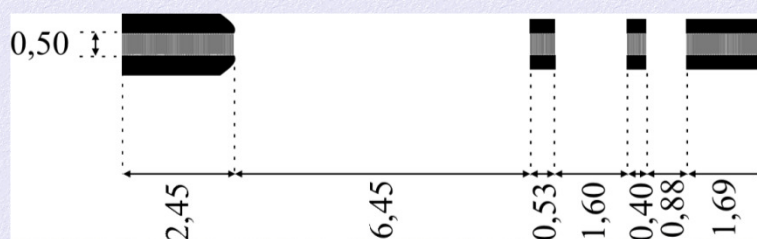
D stratami sensora,

kT_0 energią szumów anteny odbiorczej (k – stałą Boltzmann, T_0 temperatura bezwzględna),

B pasmem systemu,

F współczynnikiem szumów systemu,

S/N stosunkiem mocy sygnału użytecznego do szumu



Zastosowania

