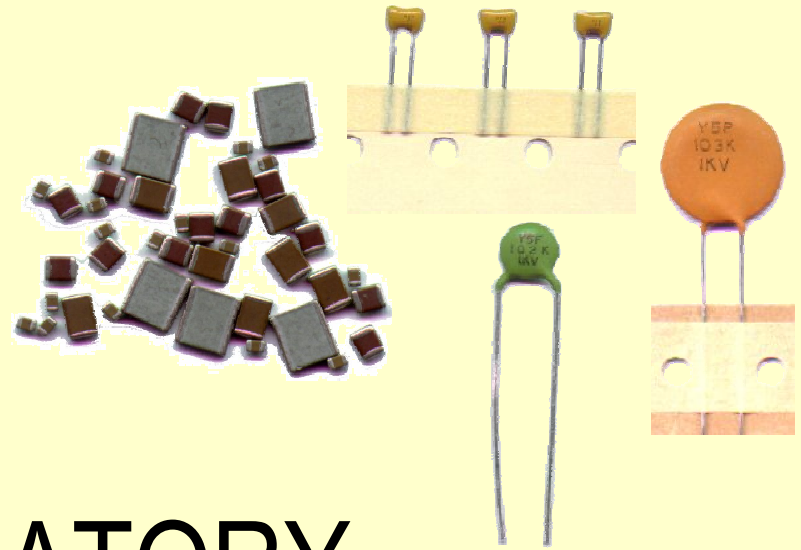




DIELEKTRYKI, IZOLATORY,
FERROELEKTRYKI,
PIEZOELEKTRYKI,

Wszelkiego rodzaju
ceramiki dielektryczne

Co to właściwie jest dielektryk?

- Materiał o zerowej lub prawie zerowej przewodności elektrycznej; materiał, w którym elektrony są związane z atomami lub molekułami;
- Fizyk ciała stałego powie, że dielektryk to materiał o szerokiej przerwie energetycznej.

Dielektryk w kondensatorze:

- Zwiększa jego pojemność

$$C = \varepsilon C_0$$

- Zwiększa energię, która może być zmagazynowana w kondensatorze:

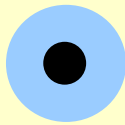
$$W = \varepsilon W_0$$

- Zwiększa maksymalne napięcie, które można przyłożyć do kondensatora:
 - Powietrze: **3 kV/mm**, Pyrex: **14 kV/mm**.

Skąd wynikają właściwości dielektryków:

Co dzieje się w dielektryku w polu elektrycznym?

- Na dodatnie i ujemne ładunki w polu elektrycznym działa siła. Zatem:



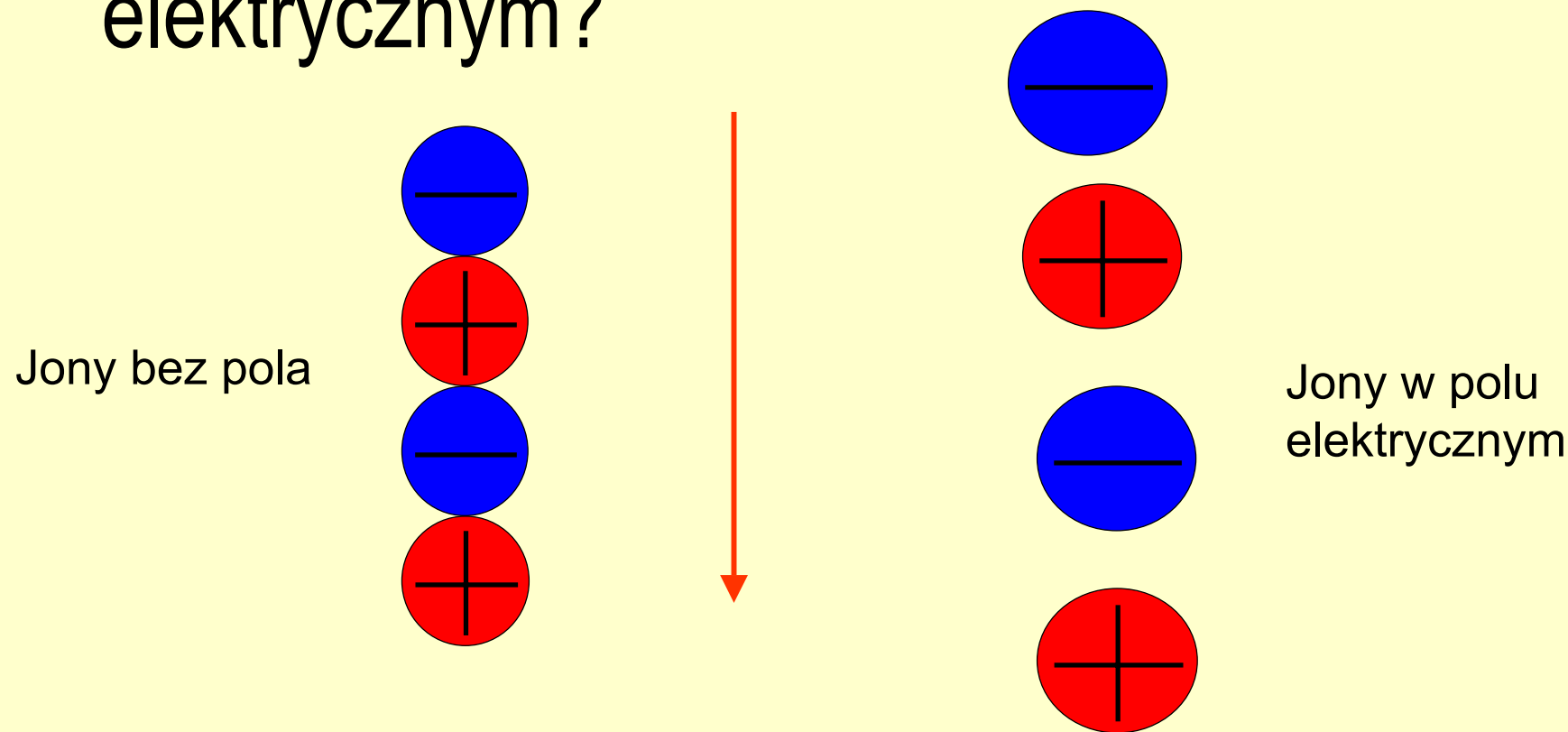
Atom bez pola



Atom w polu elektrycznym

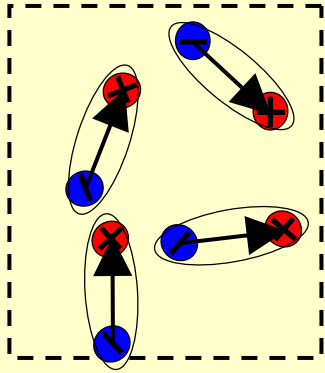
Polaryzacja elektronowa

Co dzieje się w dielektryku w polu elektrycznym?

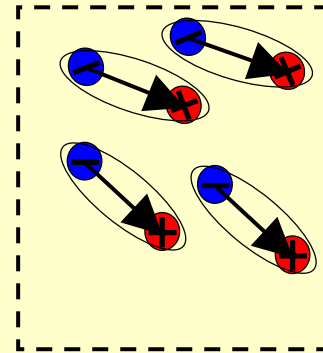
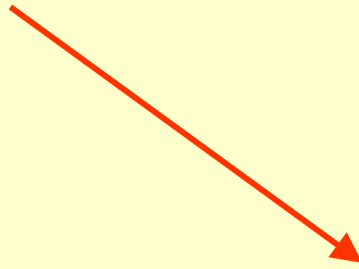


Polaryzacja jonowa

Co dzieje się w dielektryku w polu elektrycznym?



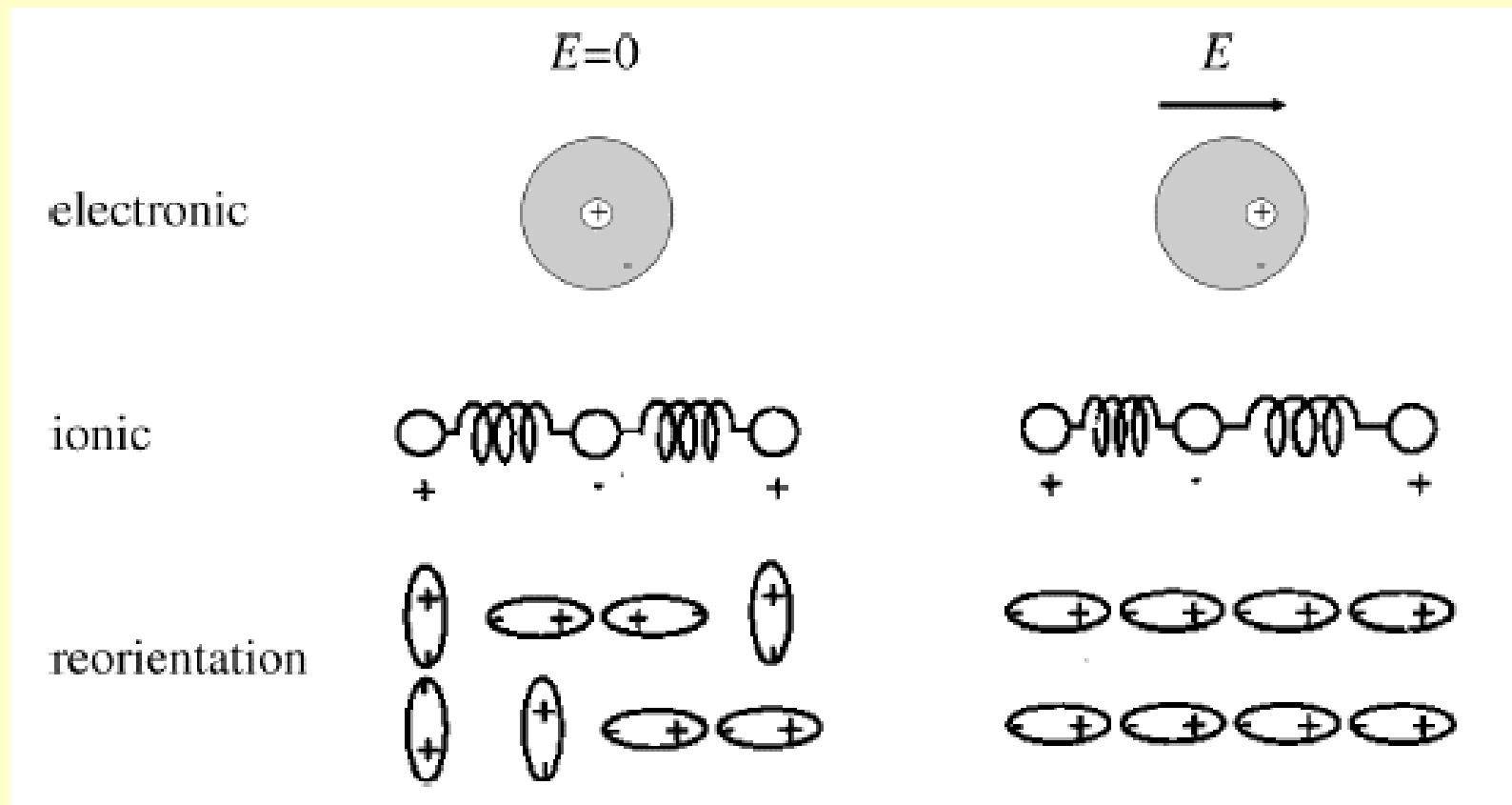
Dipole bez pola



Dipole w polu elektrycznym

Polaryzacja orientacyjna

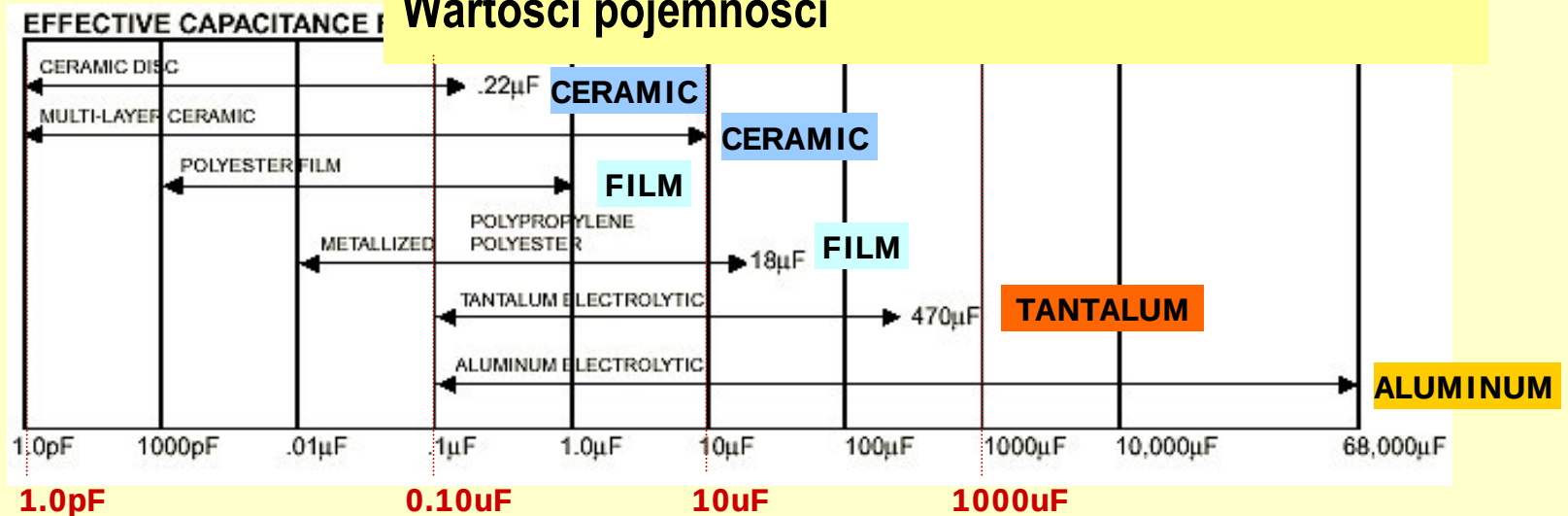
Wszystkie mechanizmy oddziaływania dielektryka z polem elektrycznym:



Przenikalności dielektryczne różnych materiałów

Material	Min.	Max.	Material	Min.	Max.
Air	1	1	Silicone	3.2	4.7
Amber	2.6	2.7	Paper	1.5	3
Barium Titanate	100	1250	Titanium Dioxide	100	
Glass	3.8	14.5	Plexiglass	2.6	3.5
Glass Pyrex	4.6	5	Water distilled	34	78
Quartz	5	5	Polyethylene	2.5	2.5
Kevlar	3.5	4.5	Polyimide	3.4	3.5
Mica	4	9	Polystyrene	2.4	3
Celluloid	4	4	Porcelain	5	6.5
Paraffin	2	3	Wood dry	1.4	2.9

Wartości pojemności

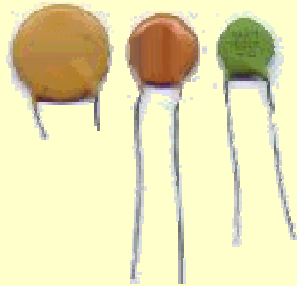


ALUMINUM } $\mu F = \text{micro-Farad} = 1 \times 10^{-6} F = 1 \text{ millionth of a Farad}$

$nF = \text{Nano-Farad} = 1 \times 10^{-9} F = 1 \text{ billionth of a Farad}$

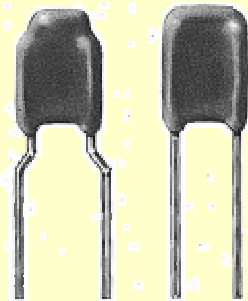
TANTALUM
CERAMIC
FILM } $pF = \text{Pico-Farad} = 1 \times 10^{-12} F = 1 \text{ trillionth of a Farad}$

Kondensatory ceramiczne



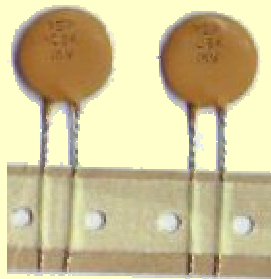
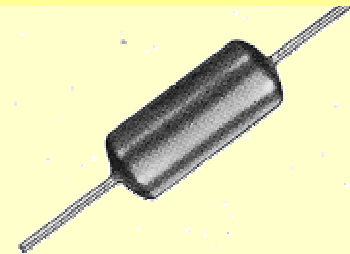
Radial Leaded Ceramic Disc

Radial Leaded "Mono"



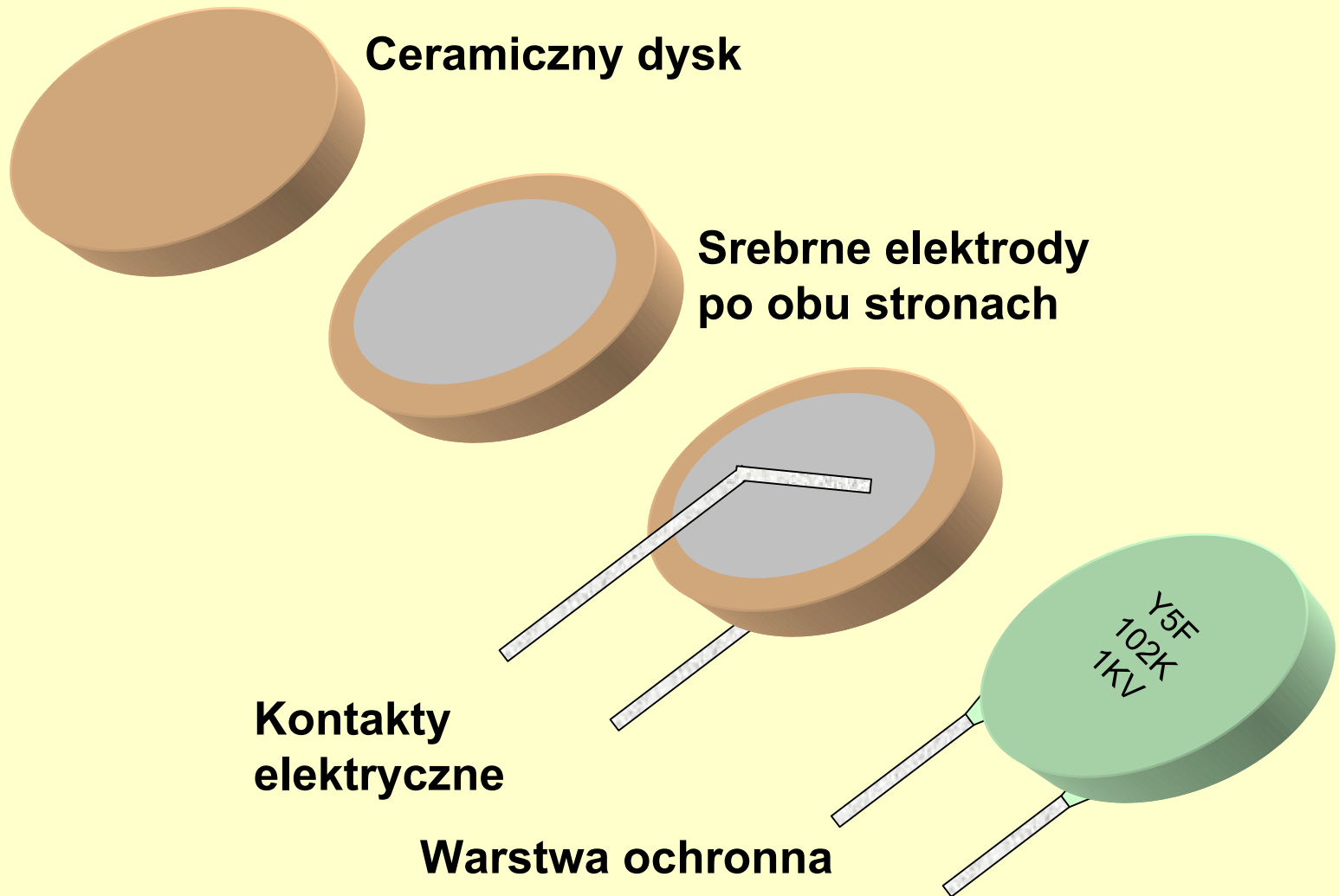
Monolithic Multi-layer Ceramic (MLC)

Axial Leaded "Mono"

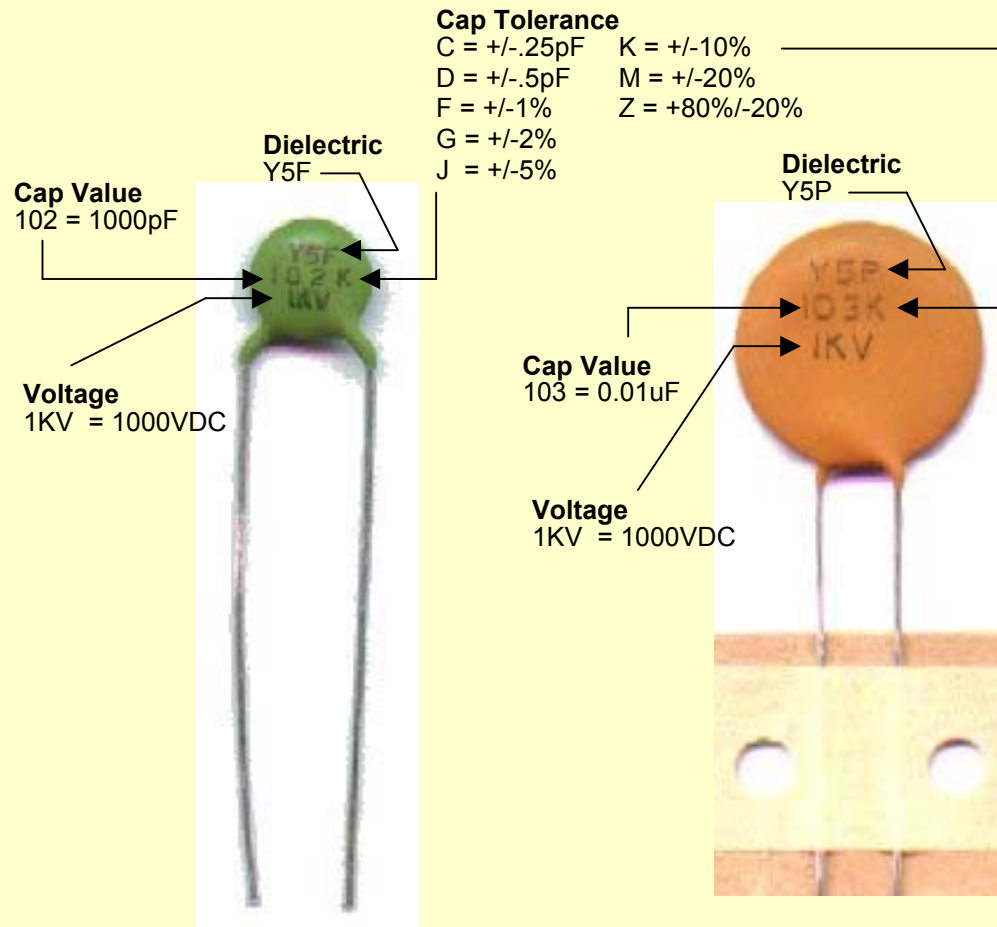


Packaged on tape for auto insertion

Jednowarstwowe, okrągłe kondensatory



Jednowarstwowe, okrągłe kondensatory

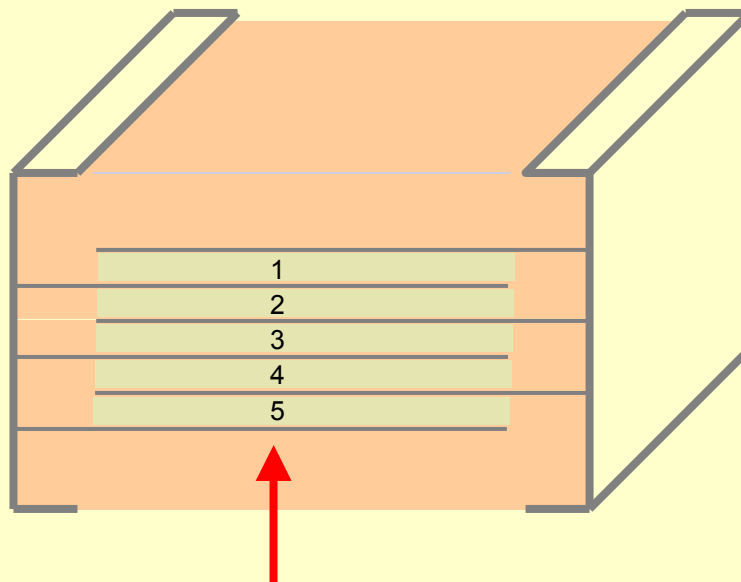


Example shown
P/N: NCD102K1KVY5F

Example shown
P/N: NCD103K1KVY5PTR

Wielowarstwowe kondensatory

Warstwy są prasowane i spiekane razem

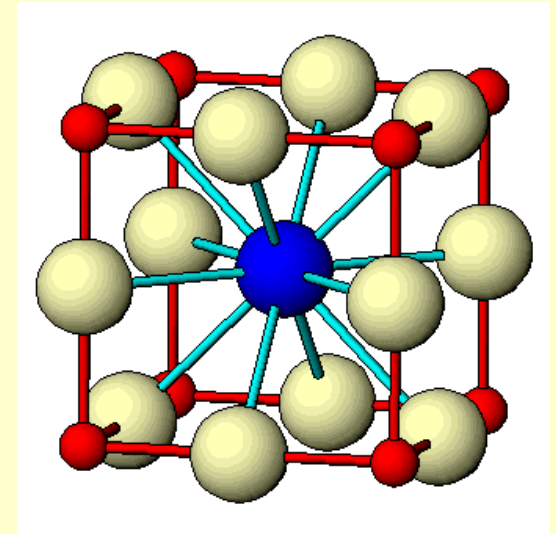


Pięć warstw - W rezultacie, pojemność jest pięć razy większa niż przy jednej warstwie.

Dielektryki to nie tylko duża
przenikalność
dielektryczna.

To również są inne, ciekawe
zjawiska:

ferro-, ferri-, piro-,
piezoelektryczność.



Ferroelektryki

Wstęp.

- Pierwszy materiał ferroelektryczny: Rochelle Salt.
- Wielki postęp w dziedzinie badań oraz zastosowań nastąpił w latach 1950,
- Obecnie najszerzej stosowany ferroelektryk to BaTiO_3 .

Ferroelektryczność.

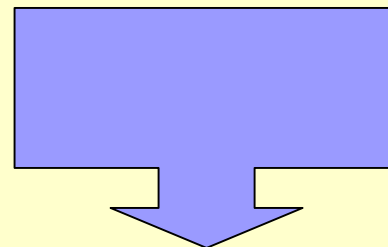
- Ferroelektryk jest to materiał, który wykazuje spontaniczną polaryzację elektryczną (nawet bez pola elektrycznego).
- Nazwa zjawiska została zapożyczona od ferromagnetyzmu (jest to mylące, gdyż ferroelektryki raczej nie zawierają atomów Fe).
- Ferroelektryki mają zazwyczaj bardzo duże przenikalności dielektryczne.
- Każdy ferroelektryk jest piezoelektrykiem (ale nie odwrotnie).

Zagadnienia:

- Materiały ferroelektryczne;
- Temperatura Curie i przemiany fazowe;
- Spontaniczna polaryzacja i efekt piroelektryczny;
- Domeny ferroelektryczne;
- Histereza dielektryczna;
- Zastosowania ferroelektryków.

Przykłady ferroelektryków

- KH_2PO_4 (123K)
- KD_2PO_4 (213K)
- RbH_2PO_4 (147K)
- GeTe (670K)
- Siarczan triglicyny
 $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$
(322K)
- Selenian triglicyny (295K)
- BaTiO_3 (408K)
- KNbO_3 (708K)
- PbTiO_3 (765K)
- LiTaO_3 (938K)
- LiNbO_3 (1480K)
- **PZT**

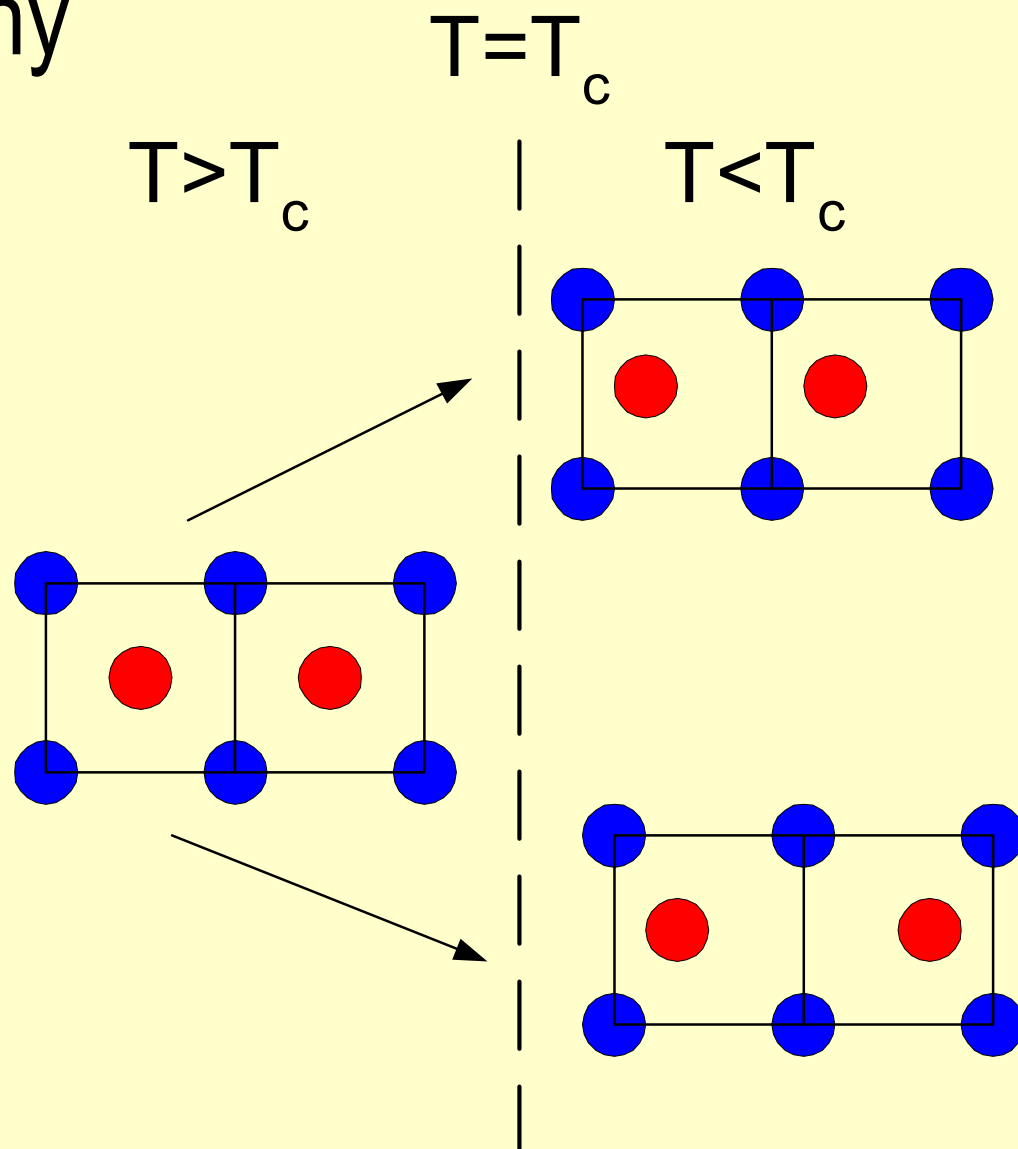


Perowskity

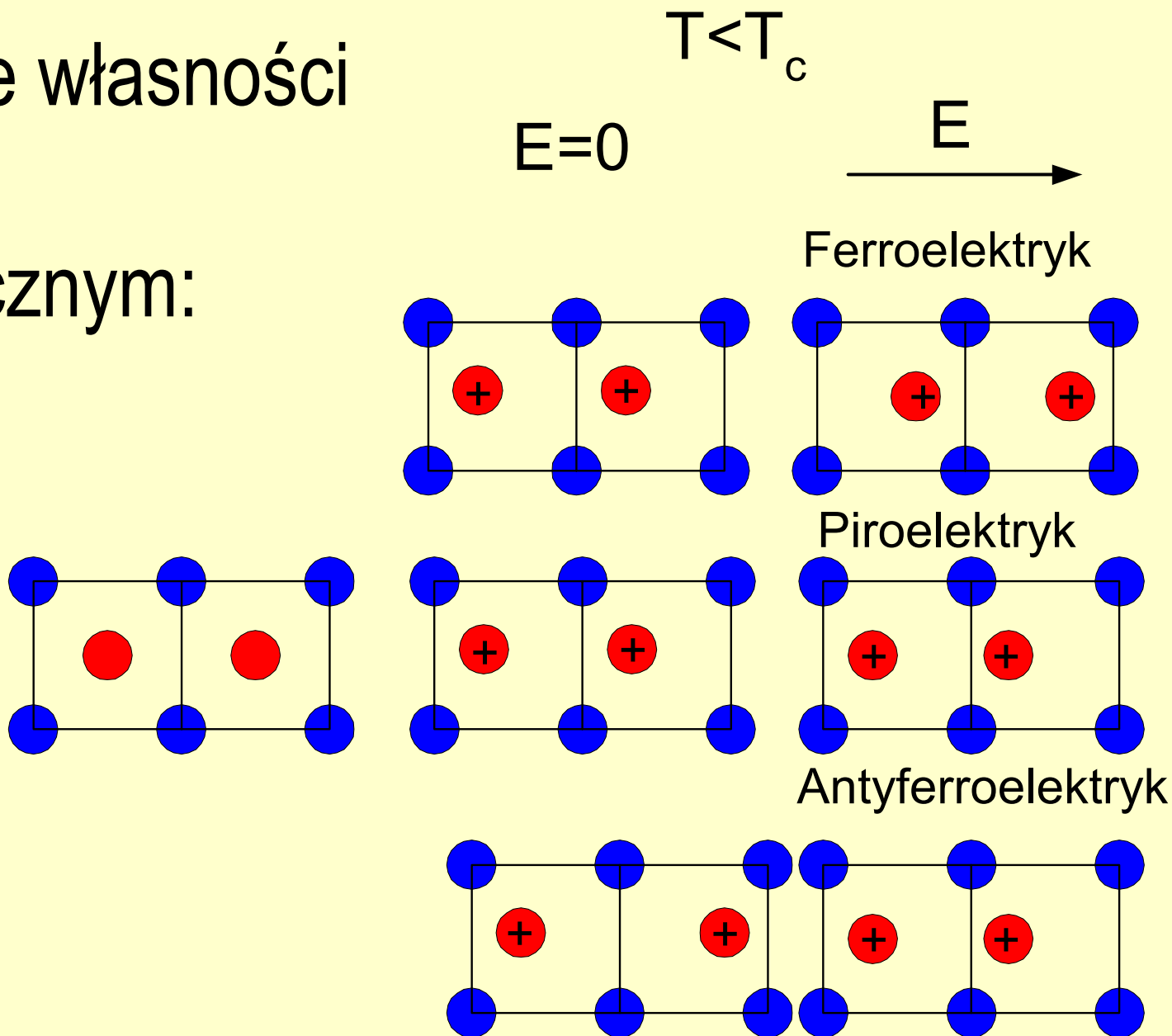
Temperatura Curie i przemiany fazowe:

- Spontaniczna polaryzacja pojawia się zazwyczaj poniżej pewnej temperatury. Temperatura krytyczna nosi nazwę temperatury Curie.
- W ceramikach ferroelektrycznych spontaniczna polaryzacja wiąże się ze strukturalnymi przemianami fazowymi (w innych materiałach ferroelektrycznych może to być też przemiana typu porządek-nieporządek).

Możliwe przemiany fazowe:



Możliwe własności
w polu
elektrycznym:



Kilka uwag:

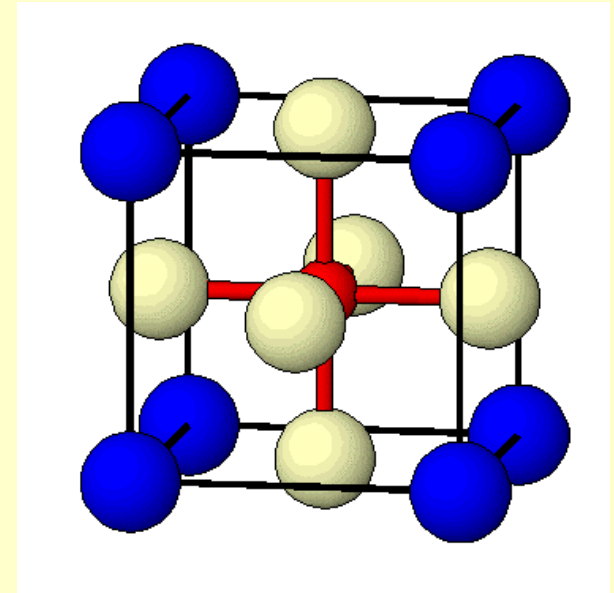
- Będziemy zajmować się tylko ferroelektrykami.
- Piroelektryk to jest właściwie to samo, co ferroelektryk, ale:
 - Ma bardzo wysoką temperaturę Curie, wobec czego nie obserwuje się go w stanie paraelektrycznym;
 - Potrzebne jest bardzo silne pole elektryczne aby zmienić jego polaryzację;
 - Odrębna nazwa wynika z jego zachowania (polaryzacja ujawnia się w ogniu).

Ferroelektryk nie może mieć środka symetrii.

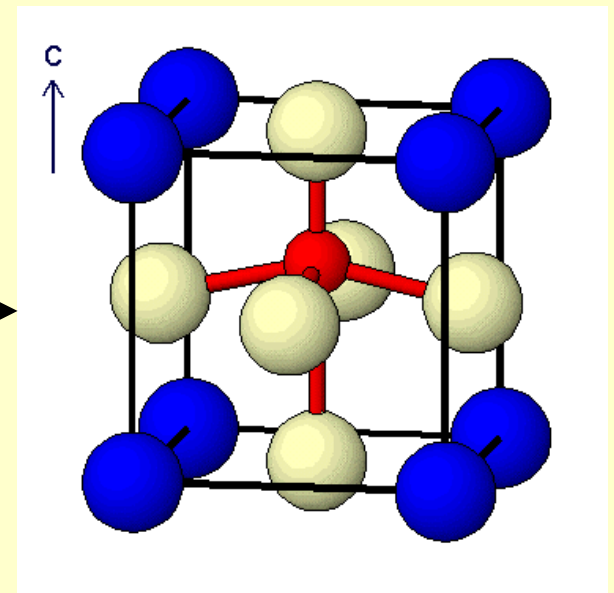
Struktura		centrosymetryczne	Bez środka symetrii	
			Piezo-	Ferro-
Triclinic		$\bar{1}$	1	1
Monoclinic		2/m	2, m	2, m
Orthorhombic		mmm	222, mm2	mm2,
Tetragonal		4/m, (4/m)mm	4, 4, $\bar{4}2\bar{2}$, 4mm, 42m	4, 4mm
Trigonal		3, $\bar{3}m$	3, 32, 3m	3, 3m
Hexagonal		6/m, (6/m)mm	6, 6, $\bar{6}2\bar{2}$, 6mm, 6m2	6, 6mm

Klasyczny przypadek ferroelektryka: BaTiO_3

Struktura regularna (powyżej
 120°C). Wiązania Ti-O są
naprężone, $> 2.0 \text{ \AA}$.



W temperaturze 120°C zachodzi
przemiana fazowa, w której Ti
przemieszcza się ze środka
sześciangu w stronę jednego z tlenów.

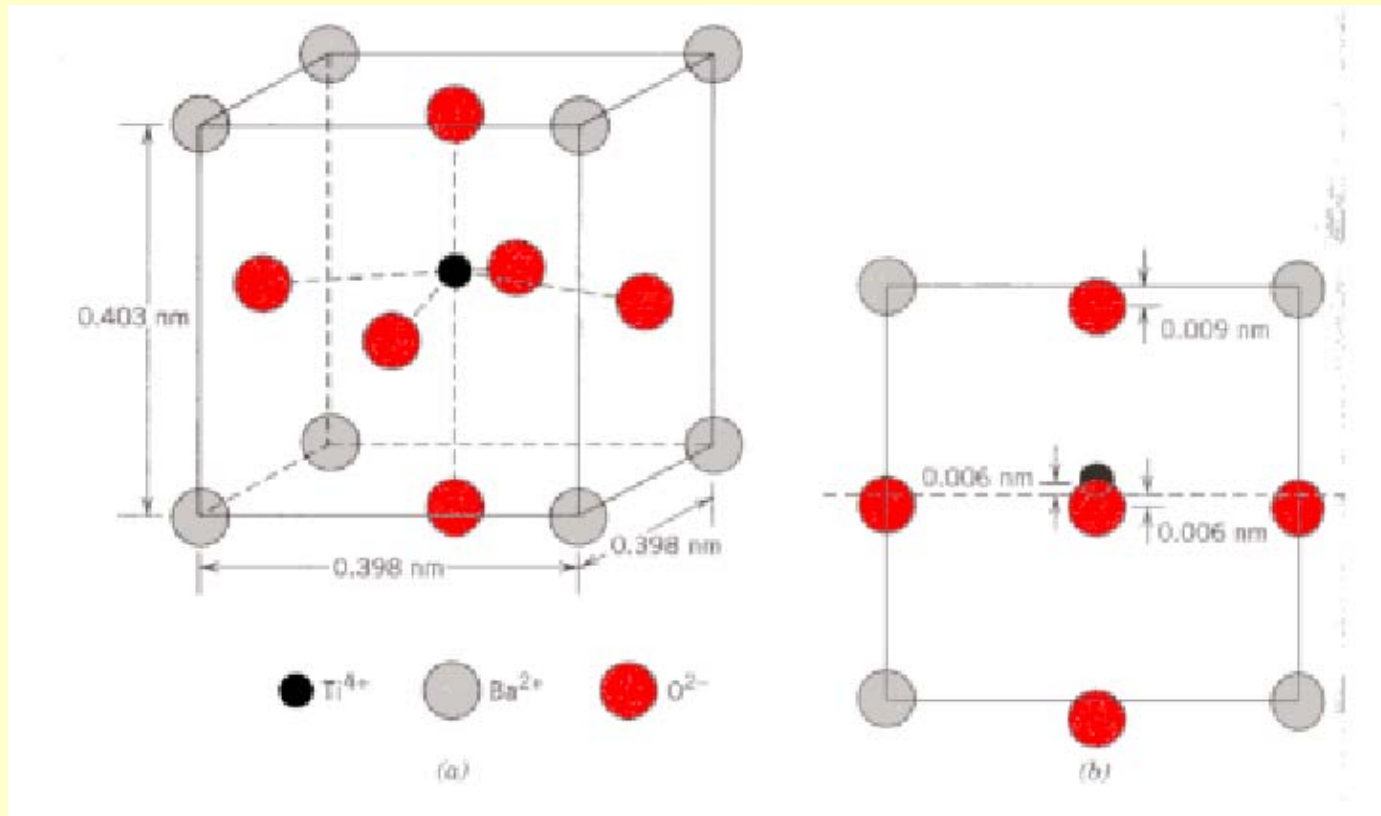


→ Struktura tetragonalna

Z taką przemianą wiążą się:

- Spontaniczna polaryzacja kryształu, czyli powstanie wypadkowego momentu dipolowego (pojawienie się właściwości ferroelektrycznych). Uwaga: polaryzacja jako wielkość, którą się oblicza (a nie zjawisko fizyczne) jest to **moment dipolowy przypadający na jednostkę objętości**.
- Duża zmiana przenikalności dielektrycznej.

Spontaniczna polaryzacja kryształu



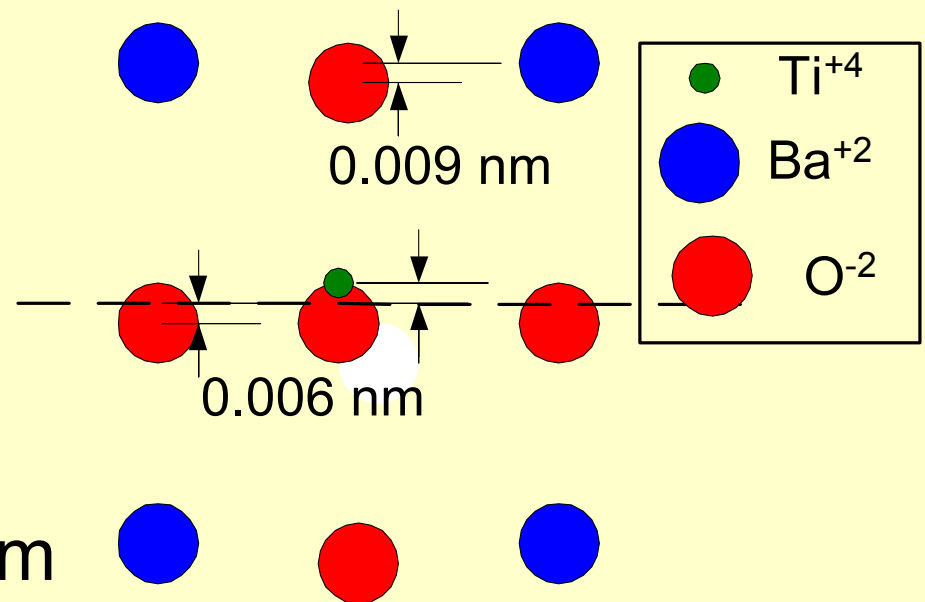
Spontaniczna polaryzacja kryształu

- Można łatwo obliczyć moment dipolowy każdej tetragonalnej komórki elementarnej.

Moment dipolowy:

$$\vec{p} = q\vec{l}$$

Gdzie q jest ładunkiem,
natomiast l jest wektorem
łączącym ładunki



Spontaniczna polaryzacja kryształu

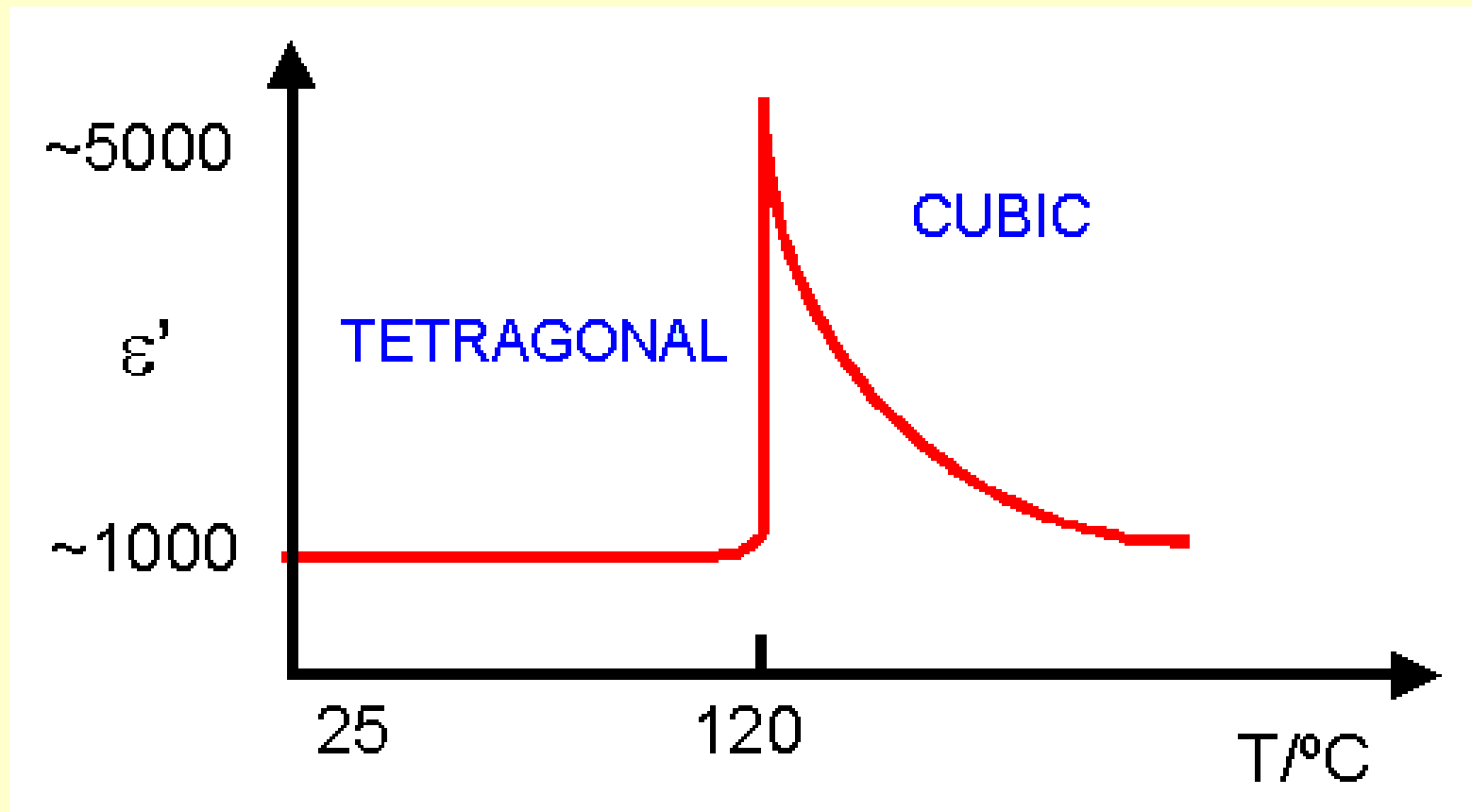
- Jony baru nic nie wnoszą.
- W rezultacie, moment dipolowy komórki elementarnej wynosi:

$$|\vec{p}| = 1.06 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}$$

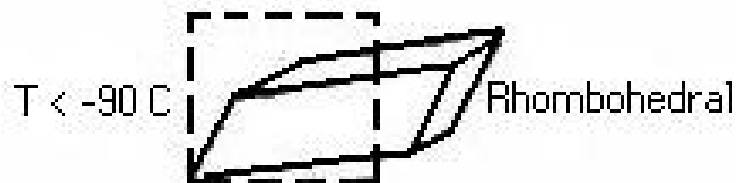
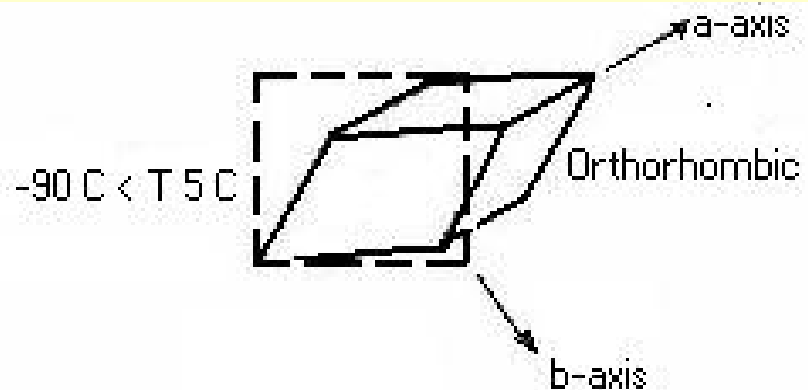
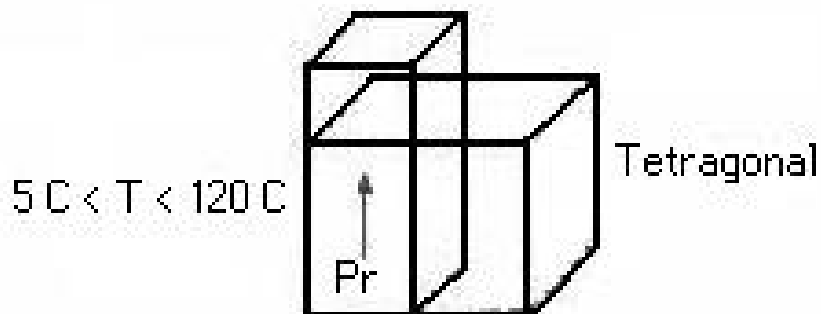
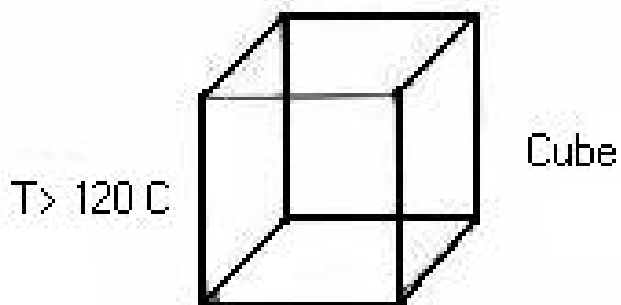
Polaryzacja:

$$P = \frac{1.06 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}}{(0.410 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3} \approx 0.16 \text{ C / m}^2$$

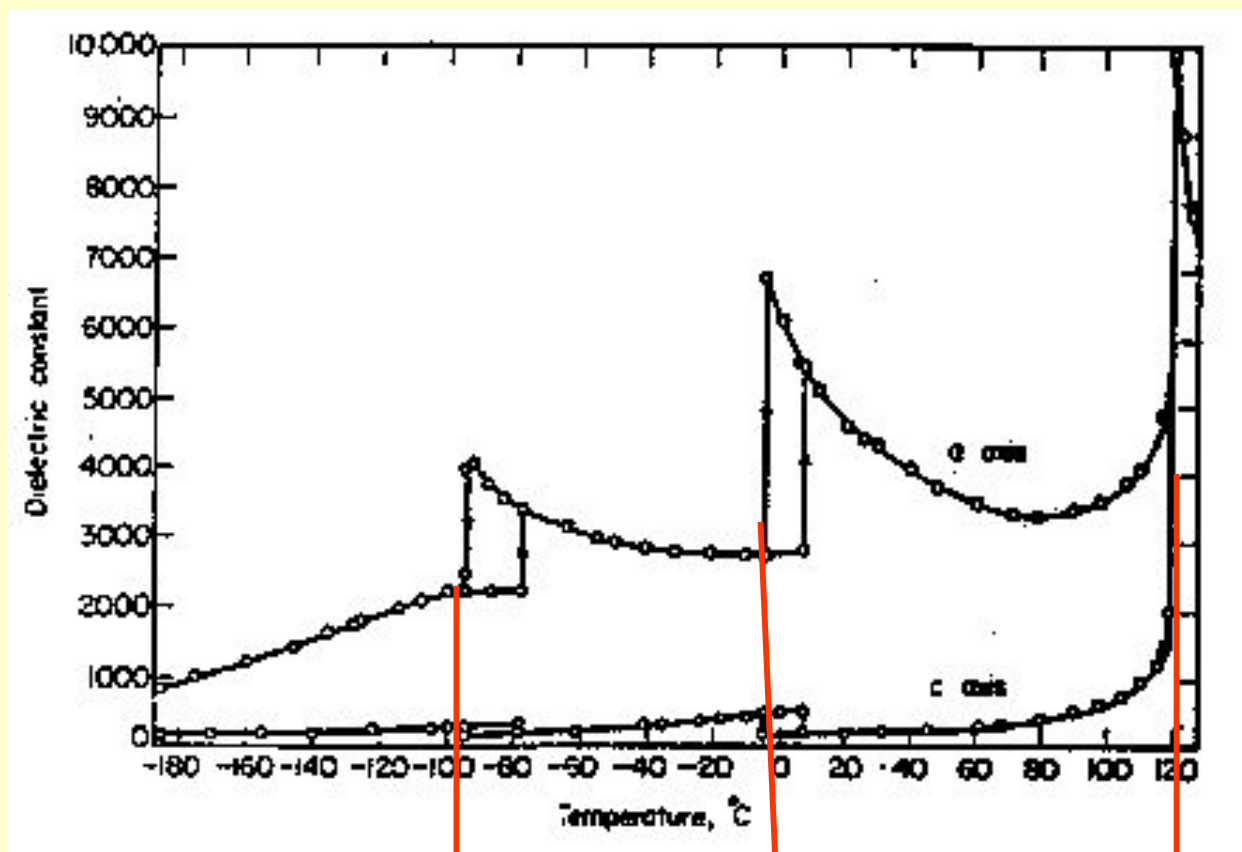
Duża zmiana przenikalności dielektrycznej:



W rzeczywistości BaTiO_3 przechodzi trzy przemiany fazowe:



W rzeczywistości BaTiO_3 przechodzi trzy przemiany fazowe:



romboedryczny

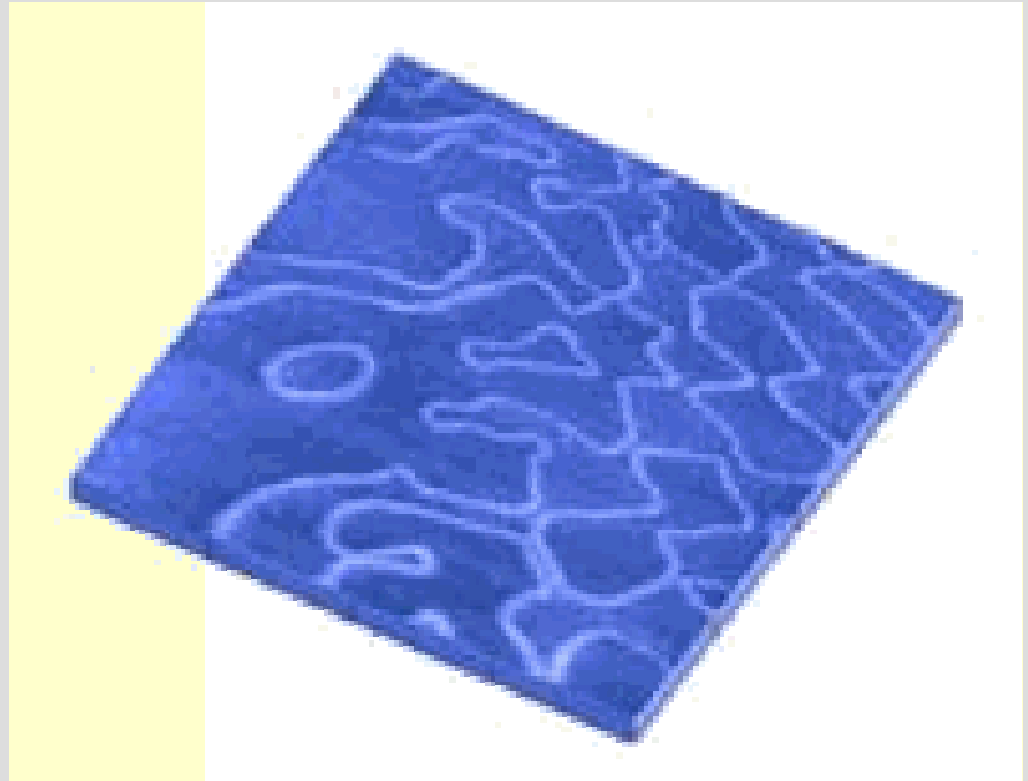
jednoskośny

tetragonalny

Domeny ferroelektryczne.

- Krysztály ferroelektryczne składają się z tzw. domen ferroelektrycznych .

AFM image of a ferroelectric crystal



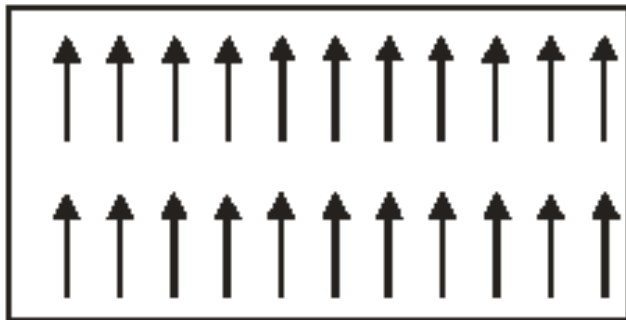
Domeny ferroelektryczne.

- Ferroelektryczna domena – obszar, w którym kryształy są spolaryzowane w tym samym kierunku.
- Sąsiednie domeny są spolaryzowane w różnych kierunkach. Kąty: 180° , 90° , $71^\circ/109^\circ$.

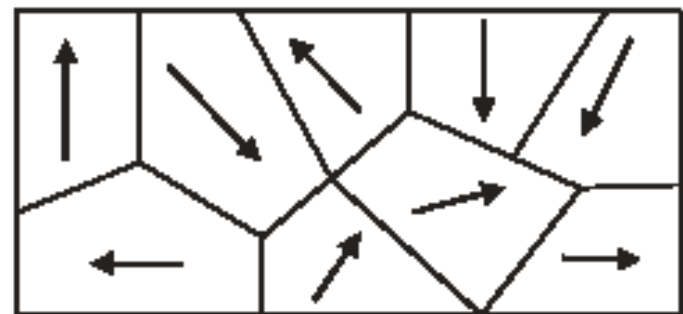
Jaffe, 1971



Domeny ferroelektryczne.



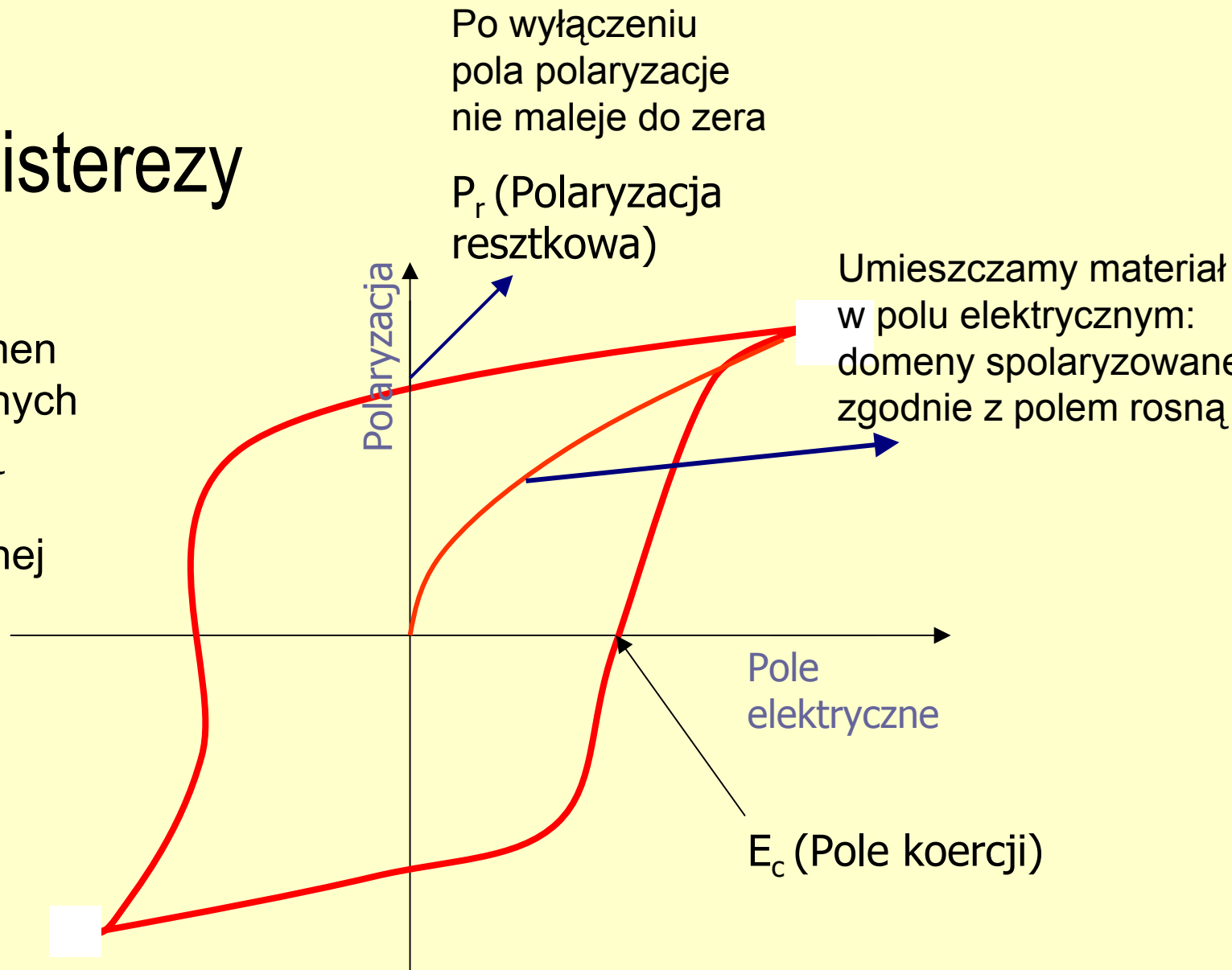
Monocrystal with single polar axis



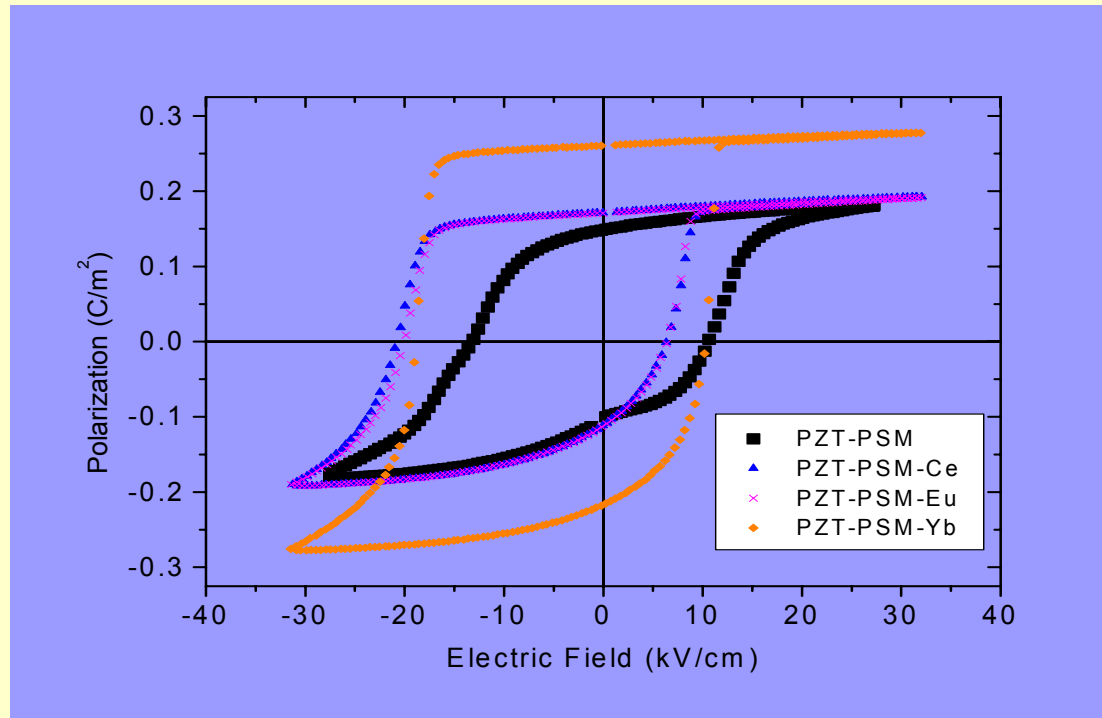
Polycrystal with random polar axis

Pętla histerezy

■ Istnienie domen ferroelektrycznych jest przyczyną histerezy ferroelektrycznej



Pętla histerezy



- Wielkość pętli histerezy zależy od pracy potrzebnej do przesunięcia ścian domenowych.

Zastosowania ferroelektryków:

- ☐ Najpowszechniej stosowane ferroelektryki;
- ☐ Jako materiały dielektryczne w kondensatorach;
- ☐ Detektory;
- ☐ Tranzystor;
- ☐ Pamięci ferroelektryczne.

Niektóre stosowane materiały:

Materiał	Wzór	$T_c(K)$	$P_s (10^{-2}Cm^{-2})a$
Barium titanate	$BaTiO_3$	183,278,393	~20
Boracite	$Mg_3B_7O_{13}Cl$	538	0.05
Lead titanate	$PbTiO_3$	763	~75
Lead zirconate	$PbZrO_3$	503	0b
Lithium niobate	$LiNbO_3$	1473	71
(KDP)	KH_2PO_4	123	5e
Rochelle salt	$NaKC_4H_4O_6$	255,297	0.25f
Sodium niobate	$NaNbO_3$	627	0b

a) Values of P_s are for single crystals at room temperature unless specified otherwise

b) Antiferroelectric at room temperature

c) Melts below T_c

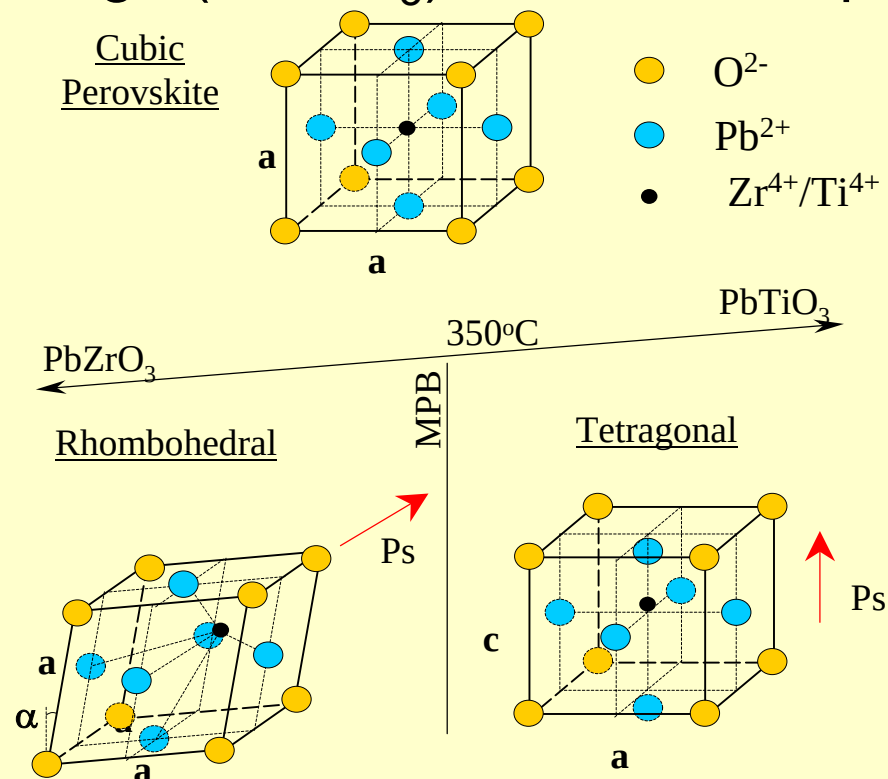
d) Decomposes at about 273 K

e) At 100 K

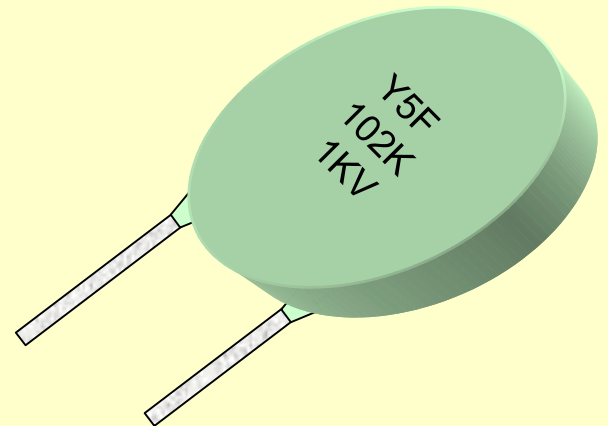
f) At 280 K

Najsłynniejszy ferroelektryk: PZT

- PZT jest to roztwór stały dwóch perowskitów:
 - tetragonalnego (PbTiO_3): 6 kierunków polaryzacji
 - romboedrycznego (PbZrO_3): 8 kierunków polaryzacji



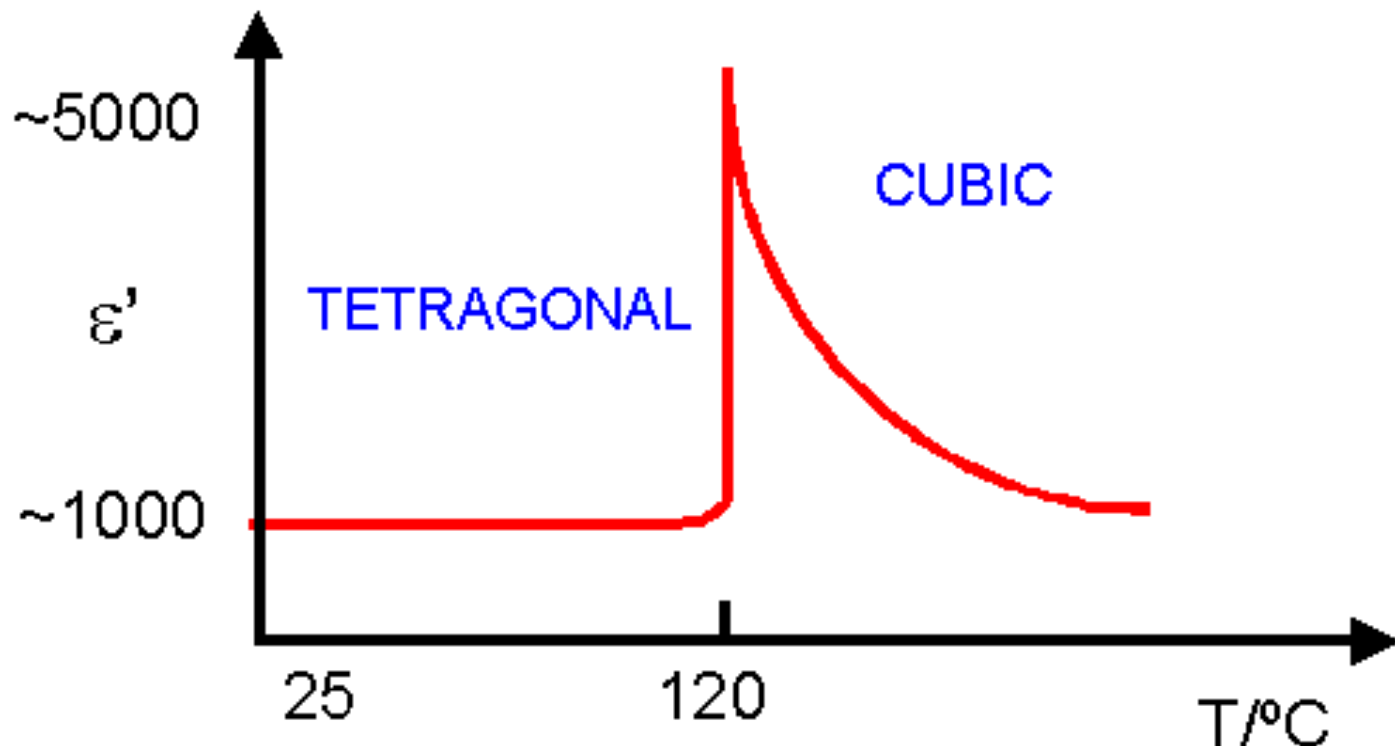
Ferroelektryki jako materiały dielektryczne w kondensatorach



Kondensatory:

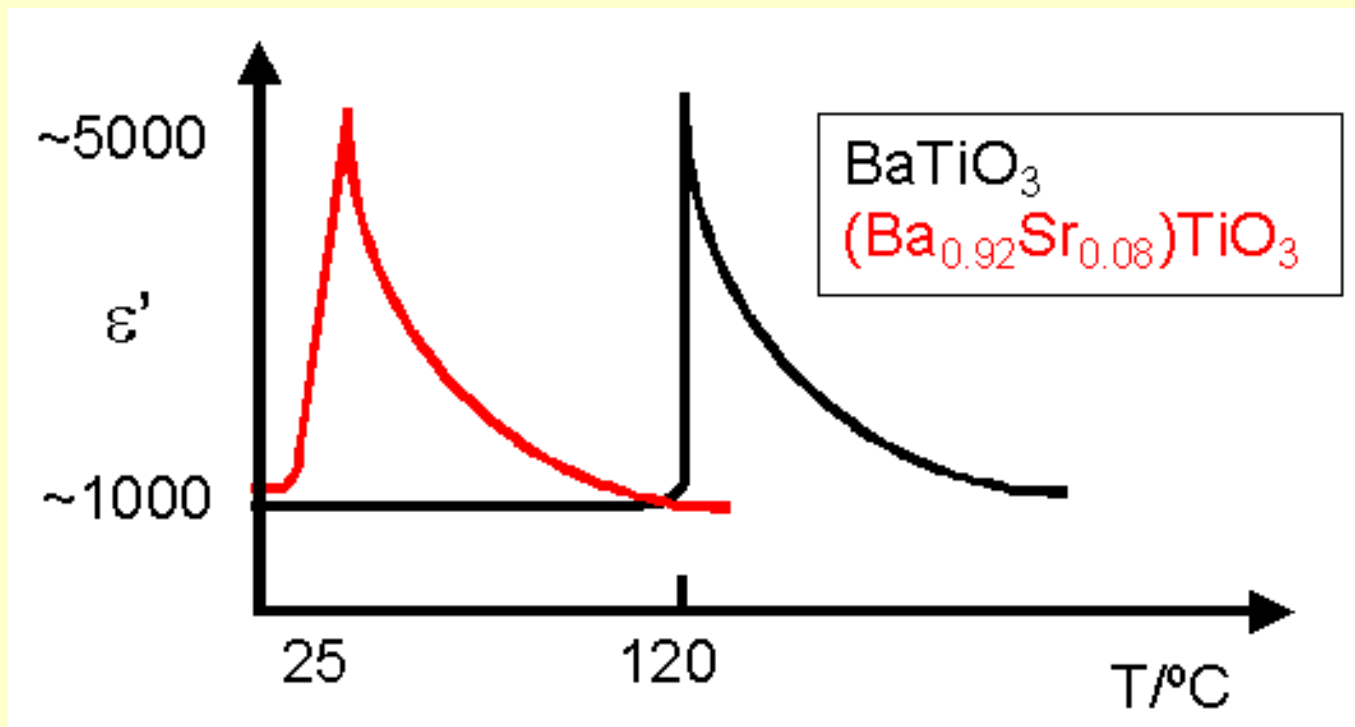
Aby dielektryk mógł być stosowany w kondensatorach powinien mieć dużą przenikalność elektryczną ϵ' . Bardzo dobry jest na przykład BaTiO_3 :

Ale w 120°C !
Kondensatory
pracują w
temperaturze
pokojowej.



Kondensatory:

Częściowe zastąpienie Ba mniejszym jonem (np. Sr^{2+}) ; powoduje zmniejszenie komórki elementarnej i obniżenie temperatury krytycznej.



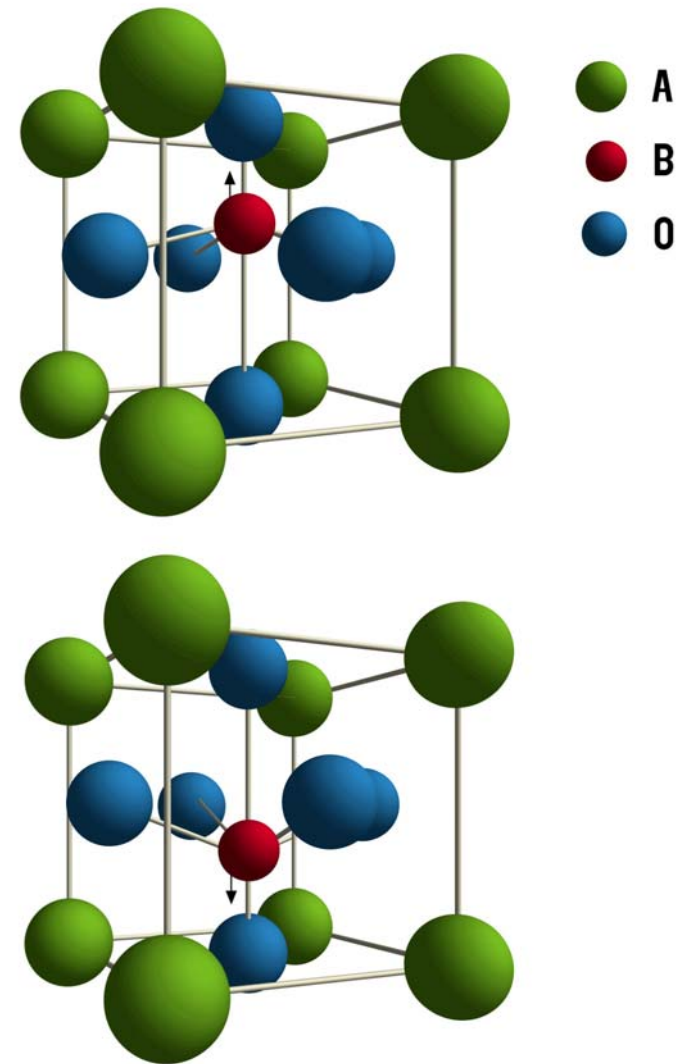
Detektory

- Detektory piroelektryczne
 - Monokryształy siarczanu triglicyny (TGS), LiTaO_3 , and $(\text{Sr},\text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$ są powszechnie używane jako detektory ciepła.

Ferroelektryczny RAM (FRAM)

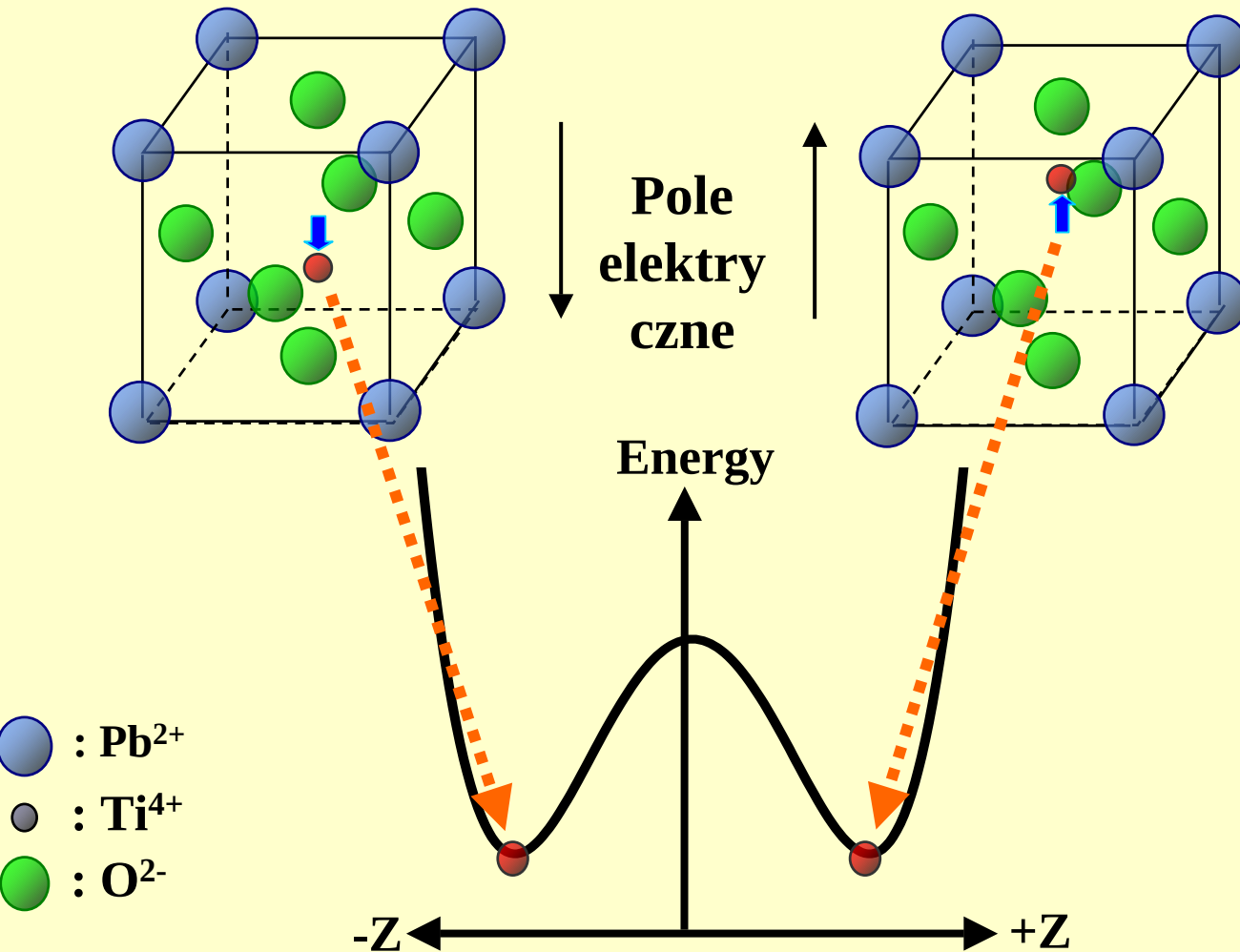
FRAM wykorzystuje istnienie trwałej polaryzacji ferroelektryka oraz możliwość jej zmiany wskutek przyłożenia pola elektrycznego.

W zerowym polu elektrycznym polaryzacja może być skierowana albo „w górę”, albo „w dół” ($+P_r$ lub $-P_r$)
‘0’ ‘1’.



Cubic Perovskite

FRAM

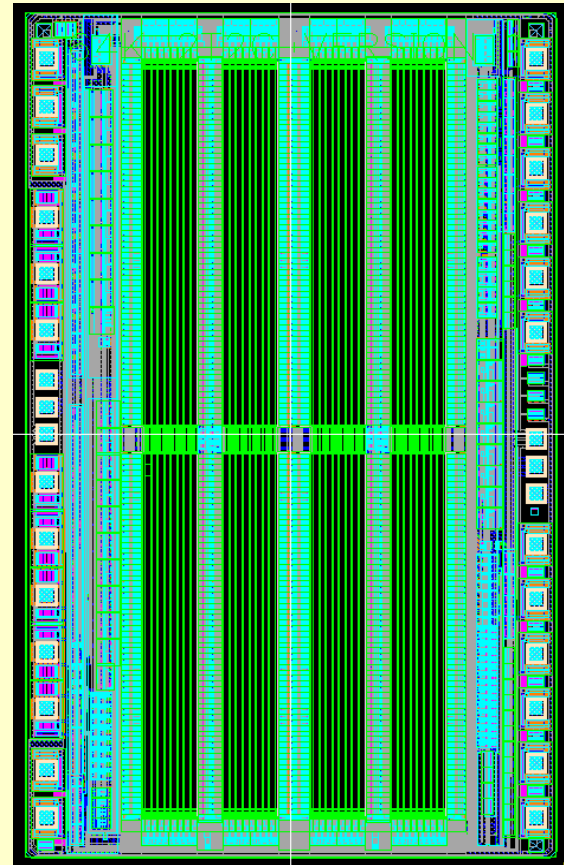


Ferroelektryk nie może samorzutnie zmienić polaryzacji: w tym celu potrzebna jest energia.

FRAM

Hynix 64K FeRAM

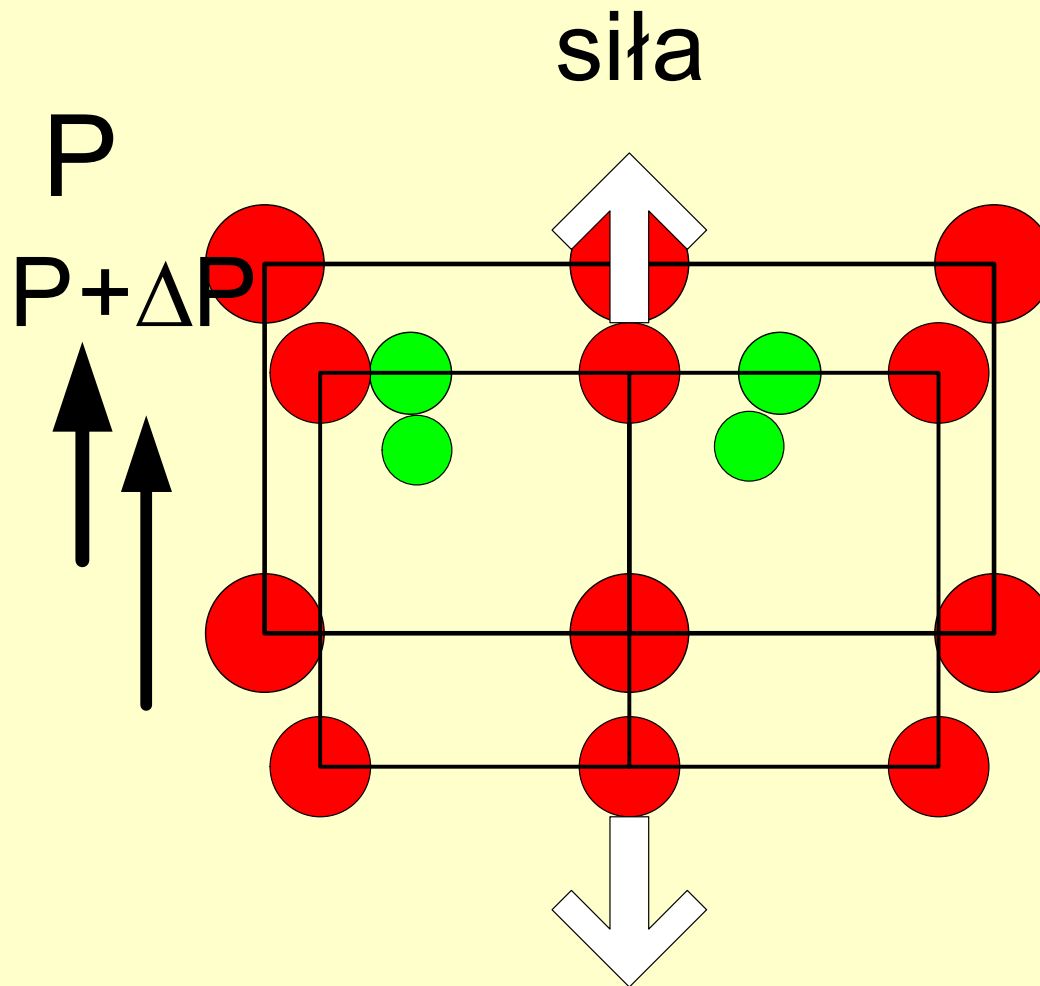
Używany ferroelektryk:
napylona warstwa
domieszkowanego **PZT**



Na czym polega piezoelektryczność?

- Efekt piezoelektryczny (prosty): zdolność niektórych kryształów do wytwarzania pola elektrycznego wskutek działania siły zewnętrznej.
- Kryształy piezoelektryczne wskutek umieszczenia ich w polu elektrycznym deformują się (odwrotny efekt piezoelektryczny).

Na czym polega piezoelektryczność?



Na czym polega piezoelektryczność?

- Istnieje zatem sprzężenie pomiędzy:
naprężeniem a polaryzacją.
- Własności piezoelektryka opisuje się za pomocą kilku wielkości fizycznych:
 - Stała sprzężenia piezoelektrycznego (d);
 - Czynniki sprzężenia elektromechanicznego (k).

Stała sprzężenia piezoelektrycznego:

$$\textit{polaryzacja} = d \cdot \sigma + (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E$$

Jednostką d jest m/V

W ceramikach piezoelektrycznych (PZT)
stała sprzężenia jest rzędu 200-500 pm/V.

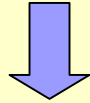
W piezopolimerach – 30 pm/V.

Najczęściej używane piezoelektryki:

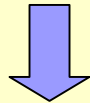
- Układ tytanian ołowiu-cyrkonian ołowiu (PZT);
- Tytanian ołowiu (PbTiO_2);
- Tytanian baru (BaTiO_3);
- Polimery (polifluorek winylidenu PVF_2).

Wytwarzanie piezoceramik

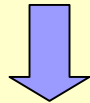
Składniki są mieszane i mielone. W przypadku PZT, są to: PbO, tlenki tytanu i cyrkonu, itd.



W pierwszym etapie spiekania powstaje struktura perowskitu.

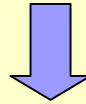


Po tym etapie dodawana jest substancja łącząca (powoduje lepszą spoistość)



Nadawany jest kształt, po czym następuje ostatnie spiekanie.

Wytwarzanie piezoceramik



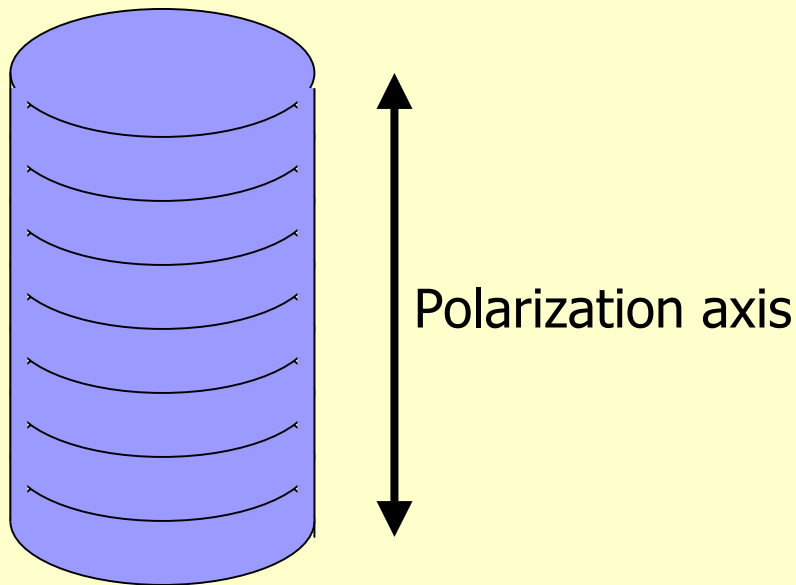
Gotowe elementy są wstępnie polaryzowane w silnym polu elektrycznym.

Wytwarzanie piezoceramik: niektóre konfiguracje piezoelementów

$$\Delta L \approx d \cdot nU$$

n – liczba warstw

U – napięcie



Złożenie szeregu elementów piezoelektrycznych powoduje zwiększenie efektu.

Zastosowania kryształów piezoelektrycznych:

- Konwersja energii mechanicznej na elektryczną:
 - Mikrofony;
 - Czujniki drgań, mierniki ciśnienia;
 - Różne urządzenia mierzące i kontrolujące położenie;
 - Zapalniki gazu;
 - Bezpieczniki.

Zastosowania kryształów piezoelektrycznych:

- Konwersja energii elektrycznej na mechaniczną:
 - Zawory;
 - Mikropompy;
 - Słuchawki i głośniki;
 - Płuczki ultradźwiękowe, rozmaite urządzenia do mieszania i robienia emulsji;
 - Wszelkie źródła ultradźwięków;
 - Tłumienie drgań.

Przykłady: tłumienie drgań.

- Piezoelektryk nie tylko może drgania wytwarzać. Może je również tłumić.
 - Wykorzystuje się je w taki sposób w stołach do precyzyjnej fotolitografii. W każdej nodze stołu są dwa zestawy piezoelektryczne. Jeden służy do detekcji drgań, drugi do wytwarzania siły tłumiącej te drgania (siła aż do 5000N);
 - Narty – piezoelektryk zaczyna drgać, a ponieważ jest podłączony do obwodu o dużym oporze – energia elektryczna jest zamieniana na ciepło.