

Pomiary temperatury

Temperatura to miara ciepła jakim charakteryzuje się konkretne ciało poddane pomiarowi. Wielkość ta jest miarą pozwalającą określić stopień nagrzania ciał.

Temperatura to wartość ściśle powiązana ze średnią energią kinetyczną zarówno ruchu jak i drgań wszelkich cząsteczek, które wchodzą w skład konkretnego układu.

Skale temperatur

- Używana w Polsce i wielu innych krajach Europy skala to stopnie Celsjusza oznaczane °C, przy interpretowaniu ich na stopnie Kalwina możemy posłużyć się tym wzorem:

$$T[K] = t[°C] + 273.15$$

- W USA, w dalszym ciągu używa się stopni Fahrenheita. W tej skali temperatura zamarzania wody jest równa 32 °F a wrzenia 212 °F. Wzór przeliczający stopnie Fahrenheita na stopnie Celsjusza:

$$T[°C] = (5/9) \cdot (t_F[°F] - 32)$$

Sposoby pomiaru:

- Pomiar dotykowy –czujnik (termometr) styka się z obiektem, którego temperaturę mierzymy.
- Pomiar bezdotykowy- poprzez pomiar parametrów promieniowania elektromagnetyczne-go emitowanego przez rozgrzane ciało, lub emitowanej energii przez obiekt.

- Termorezystory
- Termistory
- Termometry półprzewodnikowe
- Termopary
- Mierniki promieniowania

Termorezystor metalowy (RTD – Resistance Temperature Detector) wykonuje się z materiałów, których opór właściwy rośnie liniowo w funkcji temperatury (w ograniczonym zakresie temperatur) stanowi uzwojenie wykonane z metalu (niklu, platyny, miedzi) nawinięte na kształtkę z materiału izolacyjnego. Działanie jego polega na zmianie rezystancji przewodnika pod wpływem zmiany temperatury. Powstałe w ten sposób zmiany rezystancji są mierzone i stanowią miarę temperatury.

Opór metalu zależy od jego przekroju, długości i oporu właściwego:

$$R = \frac{L}{A} \rho$$

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$$

gdzie α (1/°C) – współczynnik temperaturowy



Materiał na RTD powinien mieć właściwości:

- być plastyczny, (cienkie druty)
 - mieć stabilną i powtarzalną charakterystykę
- Temperatura – opór
- być odporny na korozję
 - powinien być niedrogi

Stosowane są: złoto, srebro, miedź, wolfram, nikiel, najczęściej platyna
(Pt) – metal szlachetny, o wysokim oporze właściwym,

Pt - Najlepsza dokładność i stabilność, liniowa charakterystyka, najszerszy zakres temperatur (-200°C to 850°C), duża oporność: dostępne w wersjach 100W 200W 500W 1000W przy 0°C (Pt100-Pt1000); niewielka ilość potrzebna na czujnik. Stosowany Stosowany najczęściej w laboratoriach i przemyśle.

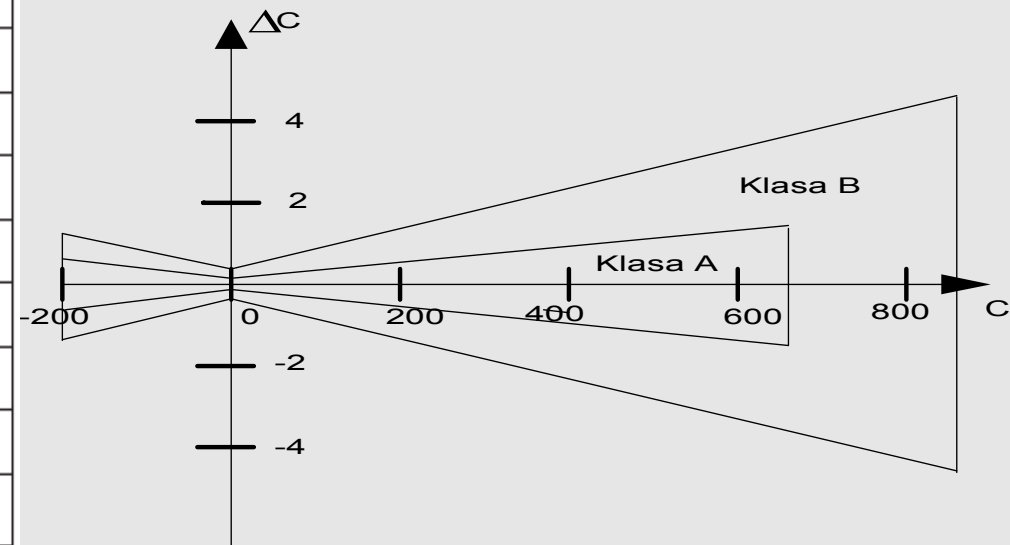
Ni – Najwyższy współczynnik temperaturowy (najwyższy sygnał), gorsza stabilność niż Pt. Zakres: -40°C to 300°C . Po przekroczeniu punktu Curie (352°C) nieprzewidywalna histereza. Spiralny przetwornik. Tani – stosowany klimatyzacja, sprzęt AGD

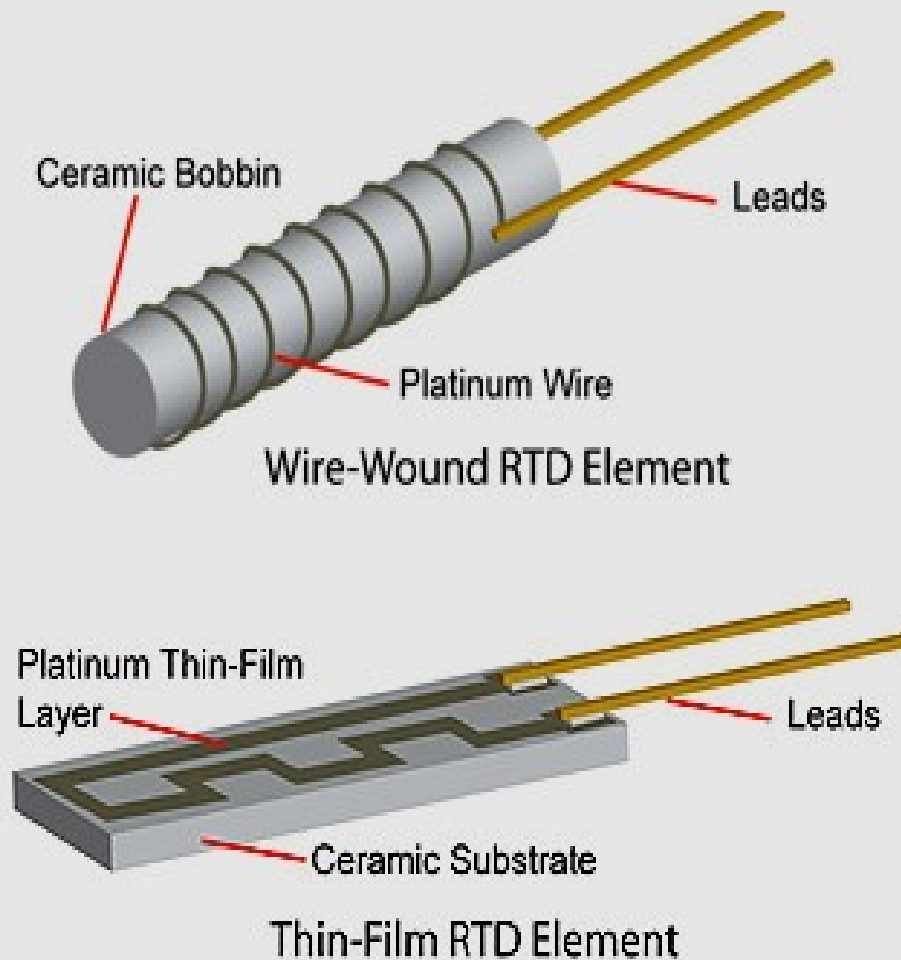
Cu - Najbardziej liniowa charakterystyka, lecz mały zakres temperatur (-73°C to 149°C). Bardzo niska oporność – potrzebny długi drut do stworzenia przetwornika (spirala lub trawiona folia). Przetworniki miedziane - rzadko. Stosowane, gdy uzwojenie i tak istnieje np. w silnikach i generatorach

Ni-Fe (30-70%) Wysoki współczynnik temperaturowy, zmienny od wytopu do wytopu (stop!). Zakres temperatur: -46°C to 343°C . Przetwornik: spirala lub trawiona folia. Jeszcze tańsze niż Ni

Niepewność czujnika związana z jego klasą wg IEC 751 PN-EN-60751

Interchangeability in °C				
Temp °C	Class B	Class A	⅓ DIN	⅒ Din
-200	1.30	—	—	—
-100	0.80	—	—	—
-50	0.55	0.25	0.18	—
0	0.30	0.15	0.10	0.03
100	0.80	0.35	0.27	0.08
200	1.30	0.55	0.43	—
250	1.55	0.65	0.52	—
300	1.80	0.75	—	—
350	2.05	0.85	—	—
400	2.30	0.95	—	—
450	2.55	1.05	—	—
500	2.80	—	—	—
600	3.30	—	—	—

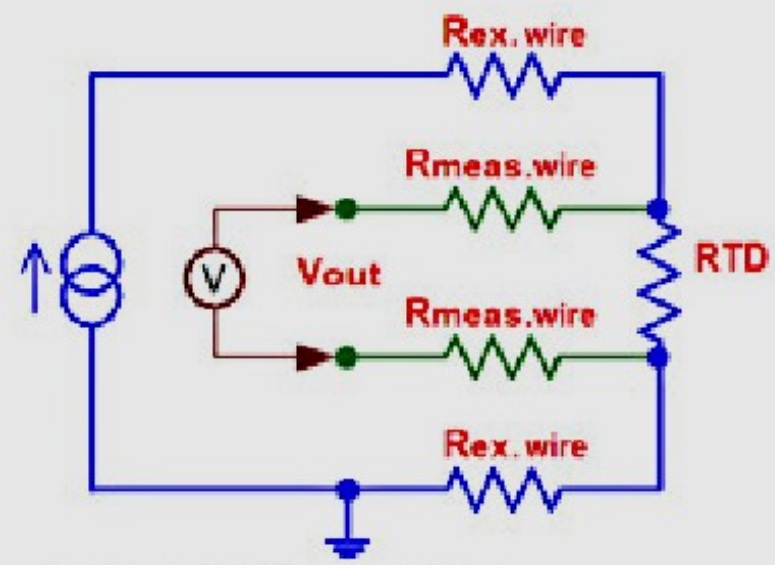
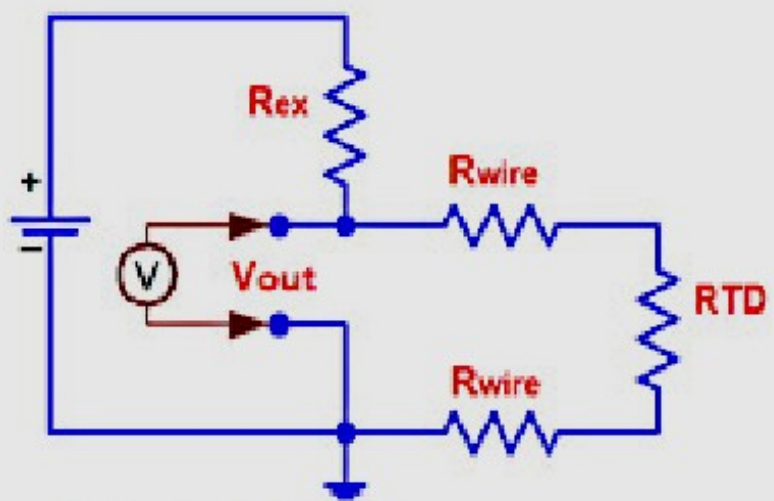
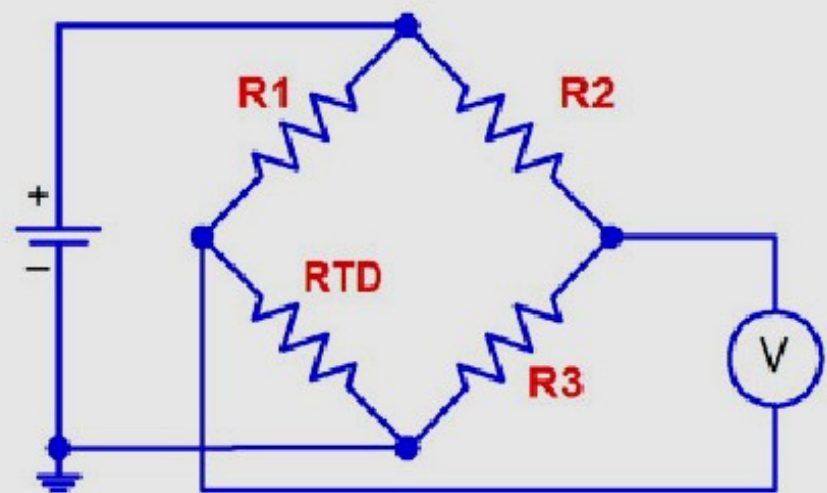
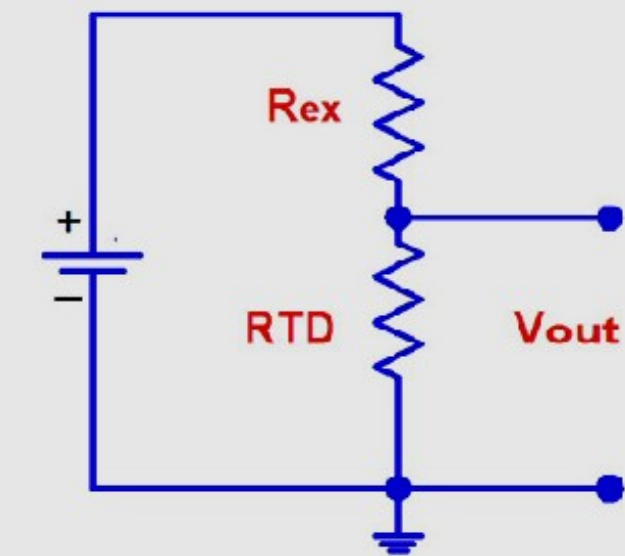




- Przetworniki RDT nie mogą być używane „luzem” – są zbyt delikatne.
- Są zwykle zabudowane w osłonie – najczęściej jest to rurka o średnicy 3-15 mm, i długości 250- 1000 mm wypełniona smarem przewodzącym ciepło i tłumiącym drgania

Stosując termorezystory (RTD) należy zwrócić uwagę na:

- konfigurację połączeń
- samo-nagrzewanie
- dokładność
- stabilność
- powtarzalność
- czas odpowiedzi



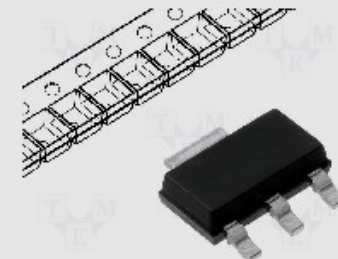
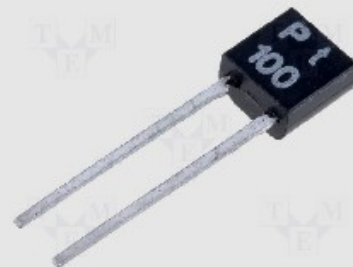
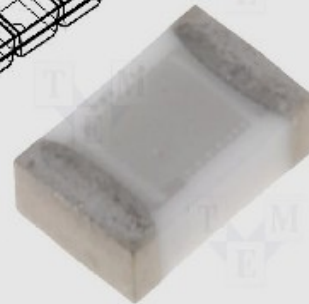
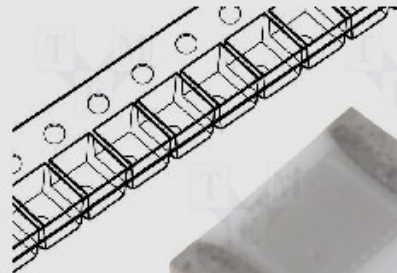
- Do pomiaru zmiany oporu potrzebny jest prąd (jak w tensometrach).
- Prąd wytwarza ciepło w ilości I^2R .
- Zwykle prąd zasilający = 1mA
- Temperatura wskazywana przez czujnik jest wyższa niż rzeczywista, zwykle $0.1^{\circ}\text{C} \div 1.5^{\circ}\text{C}$
- Samo-nagrzewanie zależy od środowiska (odprowadzania ciepła)

RTDs offer several advantages:

- A wide temperature range (approximately -200 to 850°C)
- Good accuracy (better than thermocouples)
- Good interchangeability
- Long-term stability

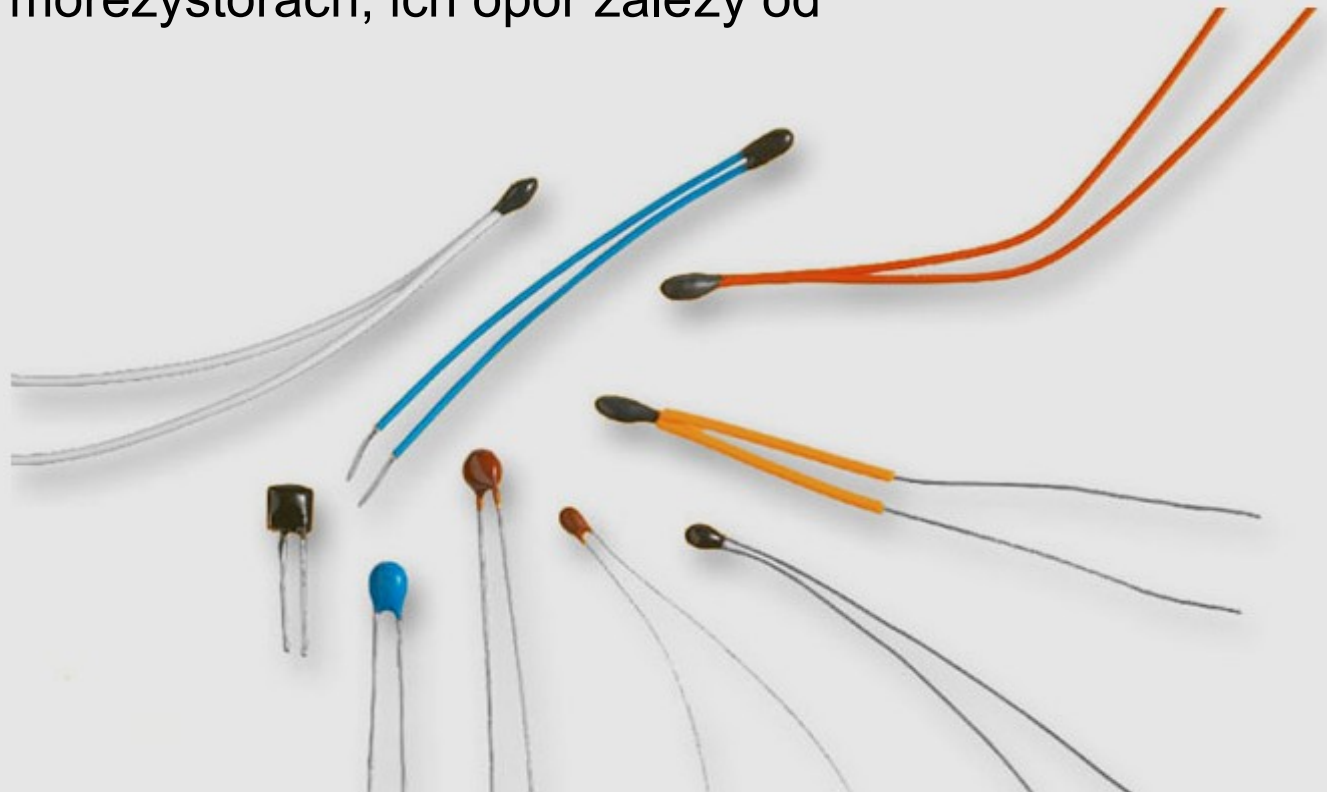
When made using metals such as platinum, they are very stable and are not affected by corrosion or oxidation.

- Drogie (zwłaszcza platynowe)
- Wymagają zasilania
- Mały opór,
- niewielka czułość ($0.4 \Omega/^{\circ}\text{C}$)
- prądy pasożytnicze
- połączenie czterema kablami
- Samo-nagrzewanie
- Duży czas odpowiedzi



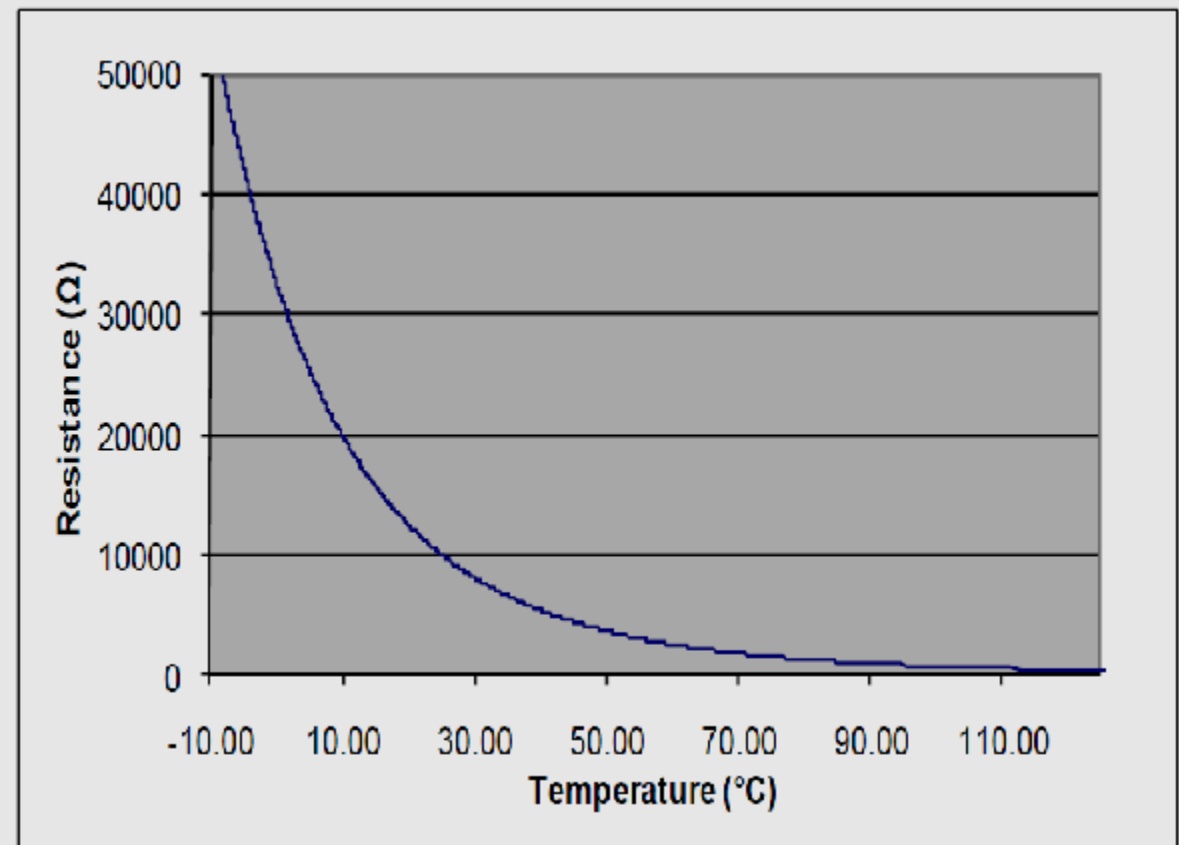
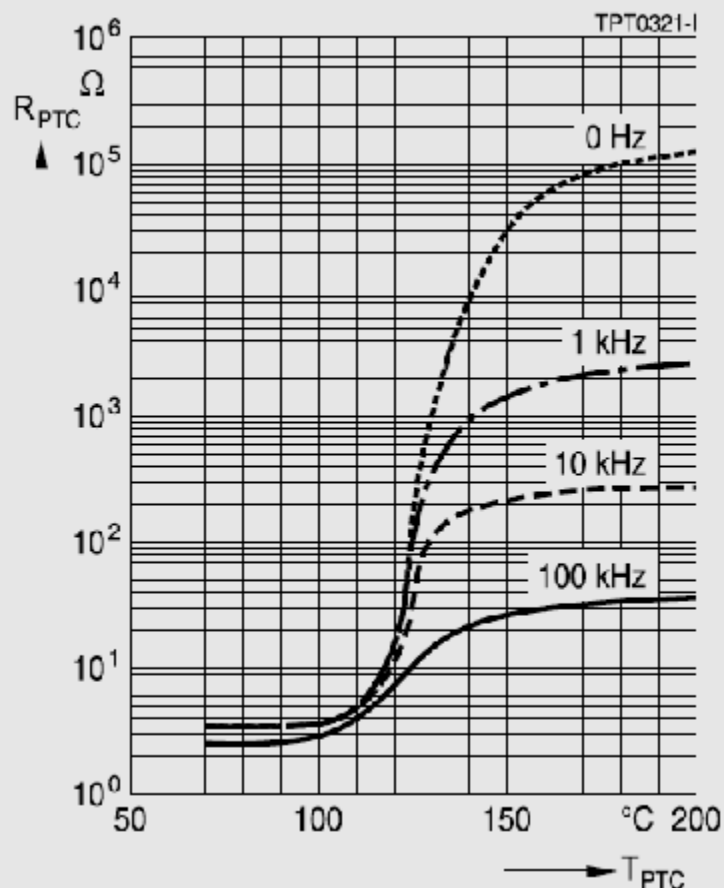
- Termistor (Thermally sensitive resistor):
 - półprzewodnik wykonany ze sprasowanych, spieczonych tlenków metali, w postaci małego koralika, dysku lub w innym kształcie, pokryty tworzywem lub szkłem.

Podobnie jak w termorezystorach, ich opór zależy od temperatury.



Są dwa rodzaje termistorów:

- o ujemnym współczynniku temperaturowym (NTC – negative temperature coefficient), których opór maleje z temperaturą silnie nieliniowo,
- o dodatnim współczynniku temperaturowym (PTC – positive temperature coefficient), których opór rośnie proporcjonalnie do temperatury



- Opór $2252\Omega \div 10000\Omega$ przy $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Termistor 5000Ω ma współczynnik temperaturowy ok. $200\Omega/^{\circ}\text{C}$ czyli bardzo wysoki (Pt 100: $0.4\text{ }\Omega/^{\circ}\text{C}$!)
- Mogą pracować do ok. 300°C
- Często montowane w stalowych obudowach ochronnych, wypełnionych smarem

- Niski koszt (bez obudowy)
- Wysoki opór
 - opór przewodów ma pomijalny wpływ, połączenie dwuprzewodowe
 - wysoka dokładność i stabilność (0.1 °C)
 - wysoka czułość
 - niewielkie wymiary
 - niska masa termiczna
 - pomiary punktowe
 - krótki czas odpowiedzi

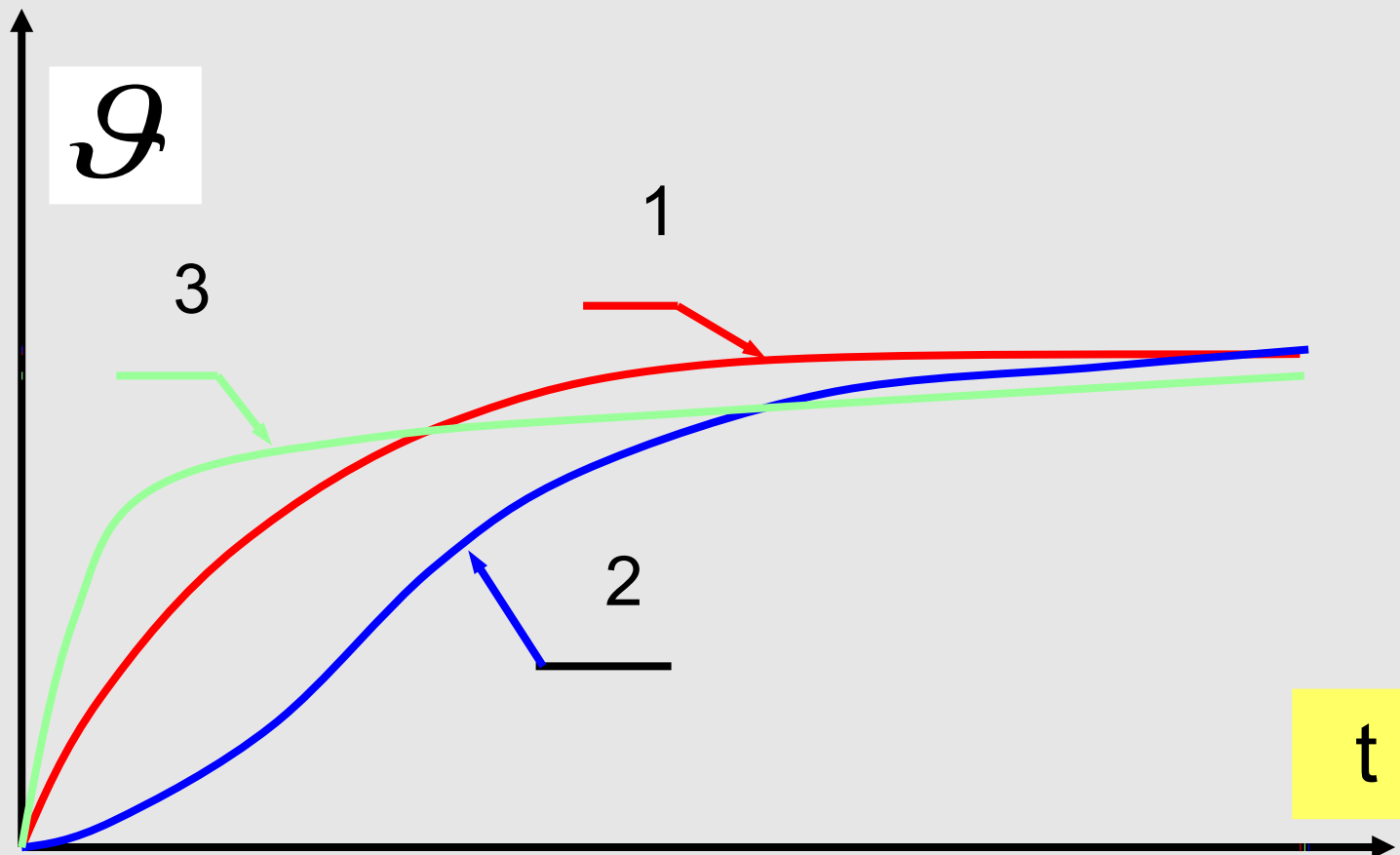
- Nieliniowość
(zwłaszcza NTC)
- Słaba zamienność między producentami
(ostatnio lepsza)
- Niewielkie natężenie prądu zasilającego
(wysoki opór = silne samo-nagrzewanie)
- Niewielki zakres ze względu na temperaturę
topnienia lutu
(współcześnie pojawiają się luty
wysokotemperaturowe)

Termometry półprzewodnikowe

- Wytwarzane jak inne obwody scalone (mikroprocesory)
- Dostępne u różnych dostawców – zupełna dowolność, brak unifikacji.
- Liniowe wyjście (linearyzacja wewnątrz), małe wymiary, ograniczony zakres temperatur ($-40 \div 150^{\circ}\text{C}$ - krzem)
- Dostępne z wyjściem napięciowym, prądowym lub cyfrowym
- Tanie, ale delikatne. Najchętniej stosowane do pomiaru temperatury urządzeń elektronicznych, wewnątrz nich.

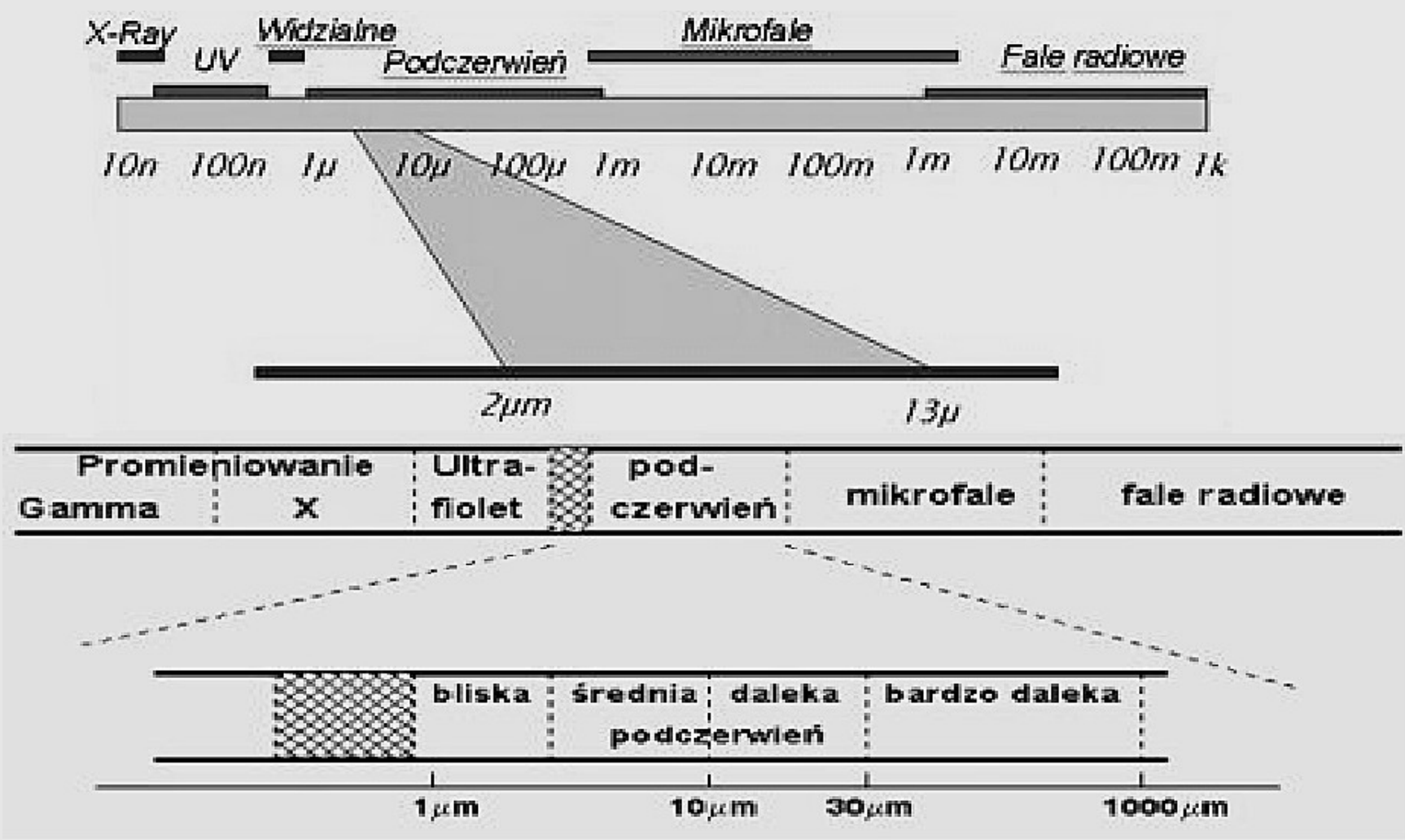
Termopary

Dynamika termometrów

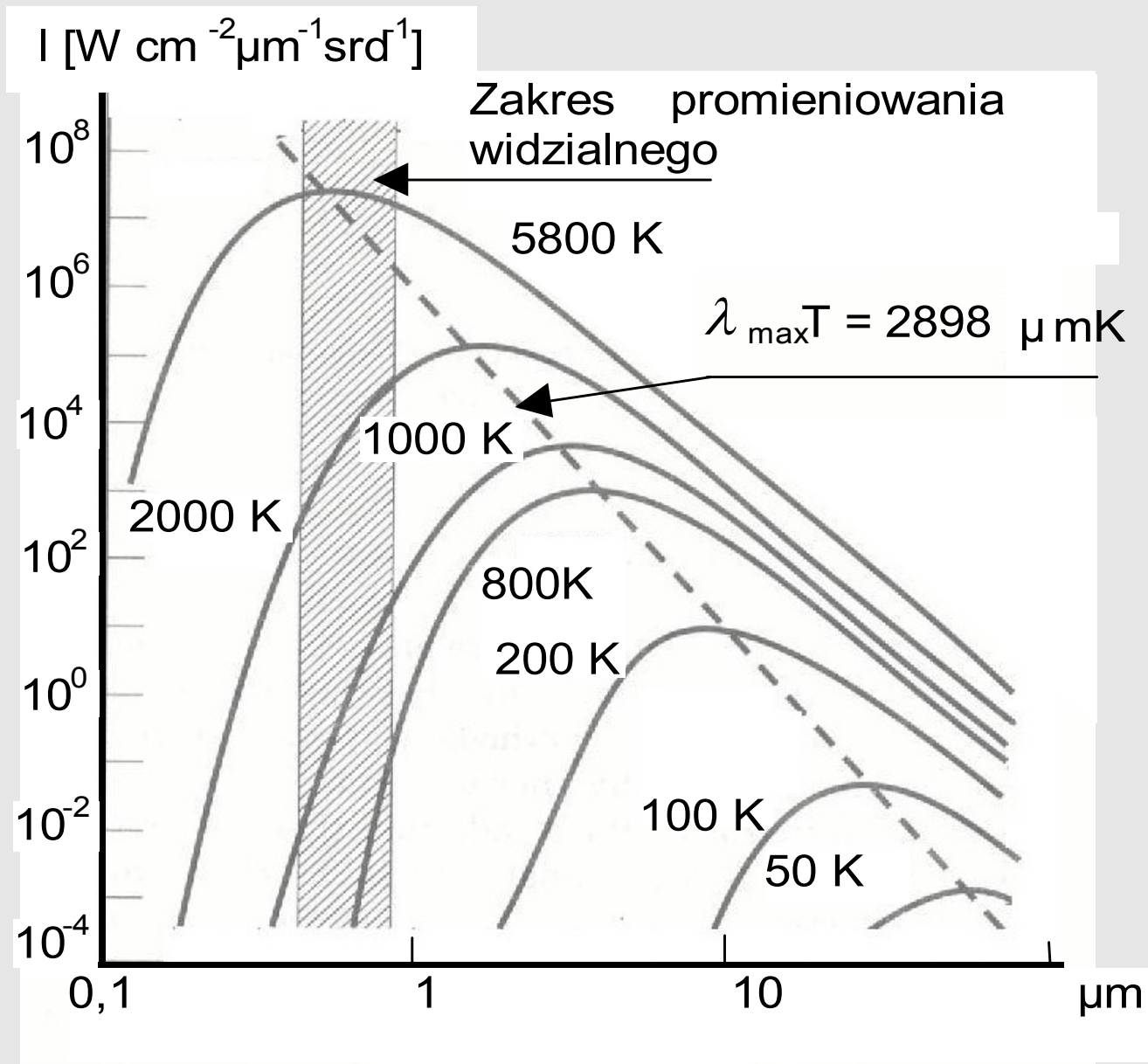


TERMOWIZJA

Widmo elektromagnetyczne



Podział widma elektromagnetycznego ze względu na długość fali



Rozkład widmowy promieniowania ciała czarnego

Prawo Stefana-Boltzmannna

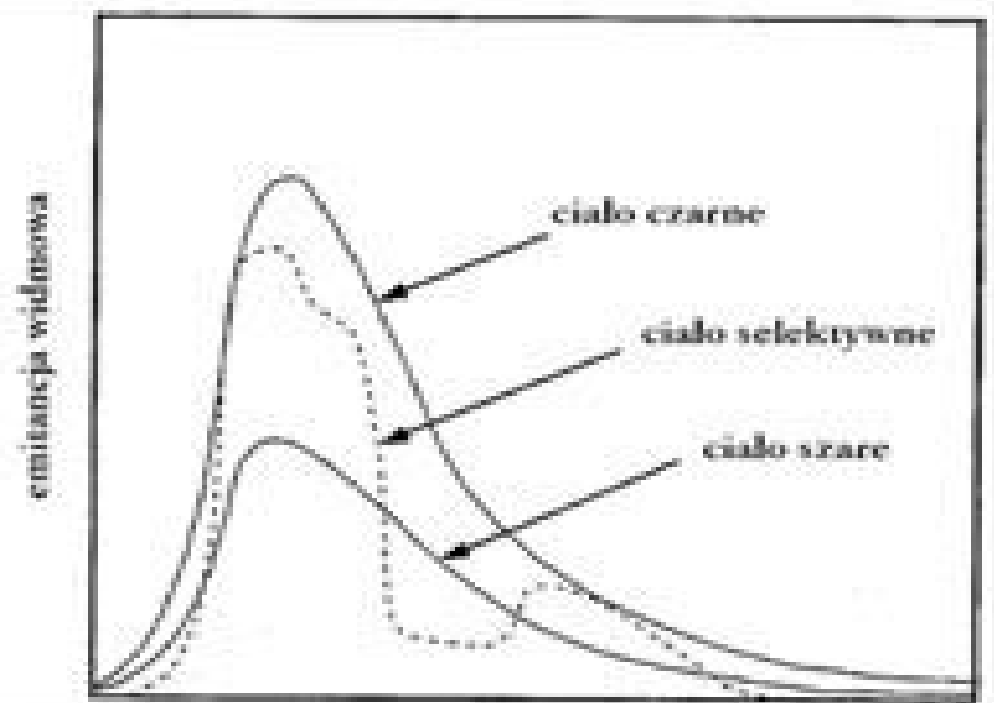
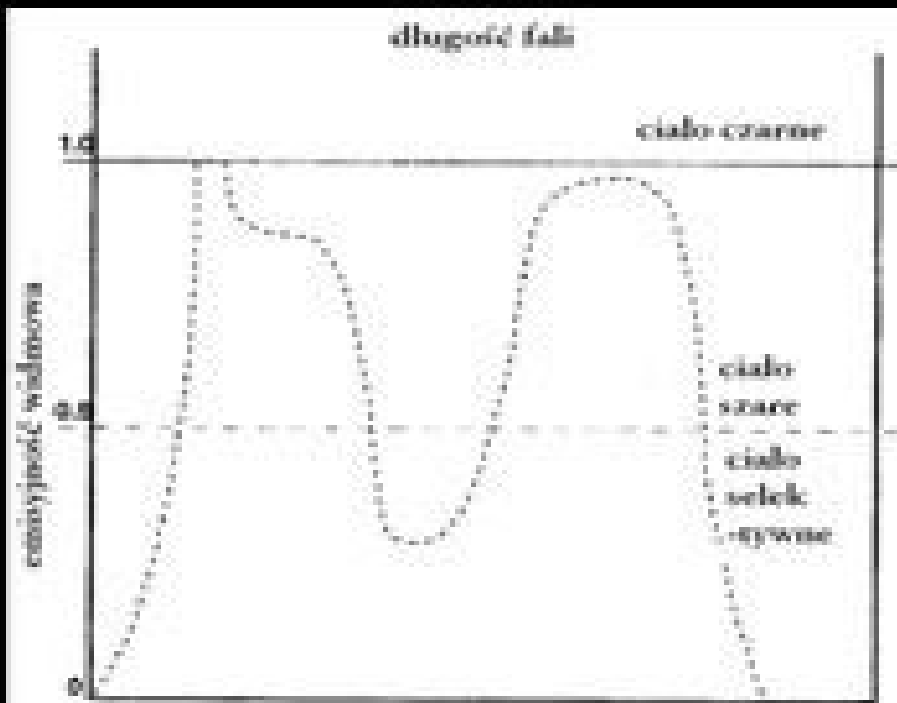
$$E = \sigma T^4 \text{ [W]}$$

σ = stała Stefana –Boltzmannna = $5,67 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

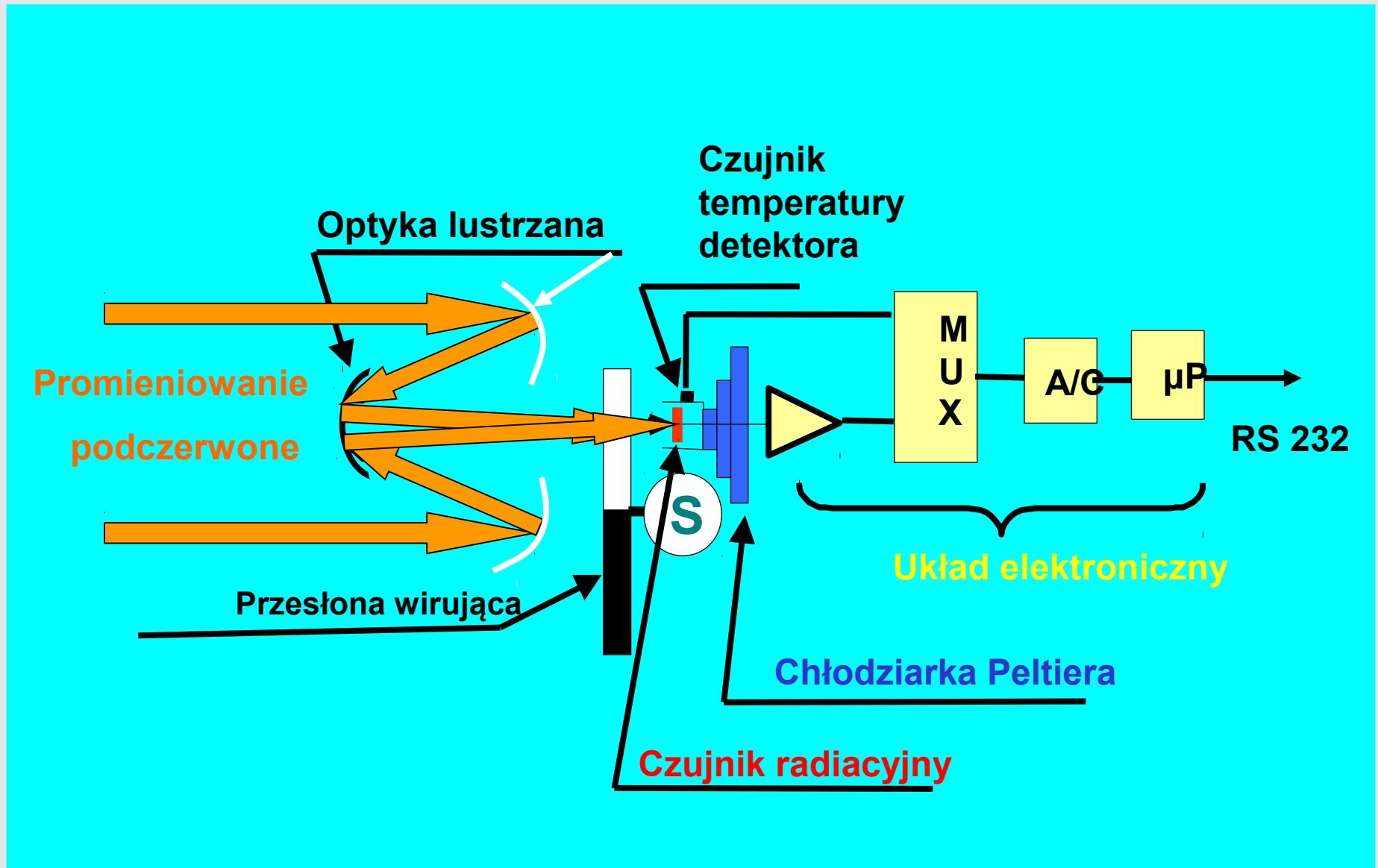
Ciało nieczarne (szare)

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W]}$$

ε = współczynnik emisyjności ciała szarego



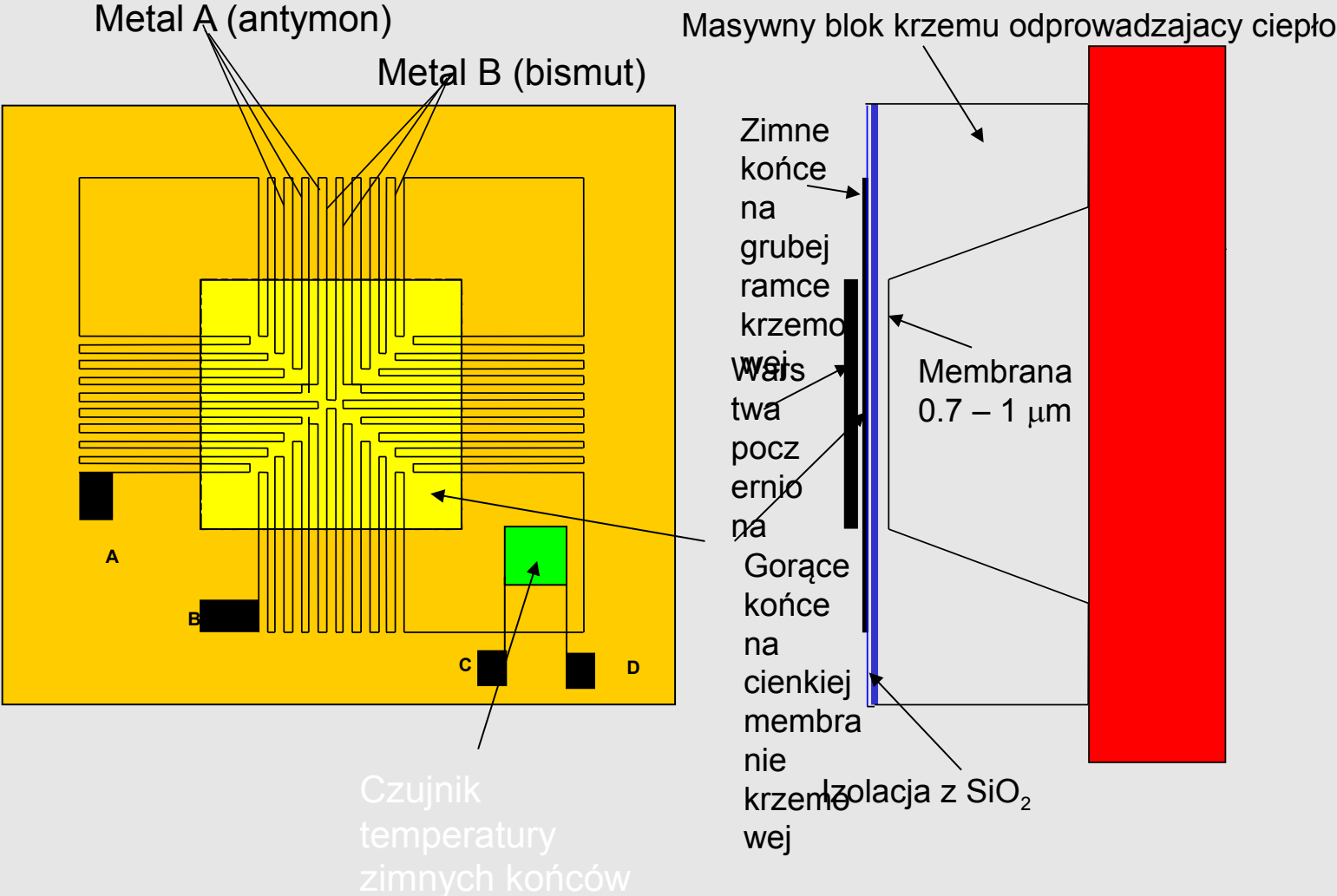
Podstawowe elementy składowe termometru radiacyjnego



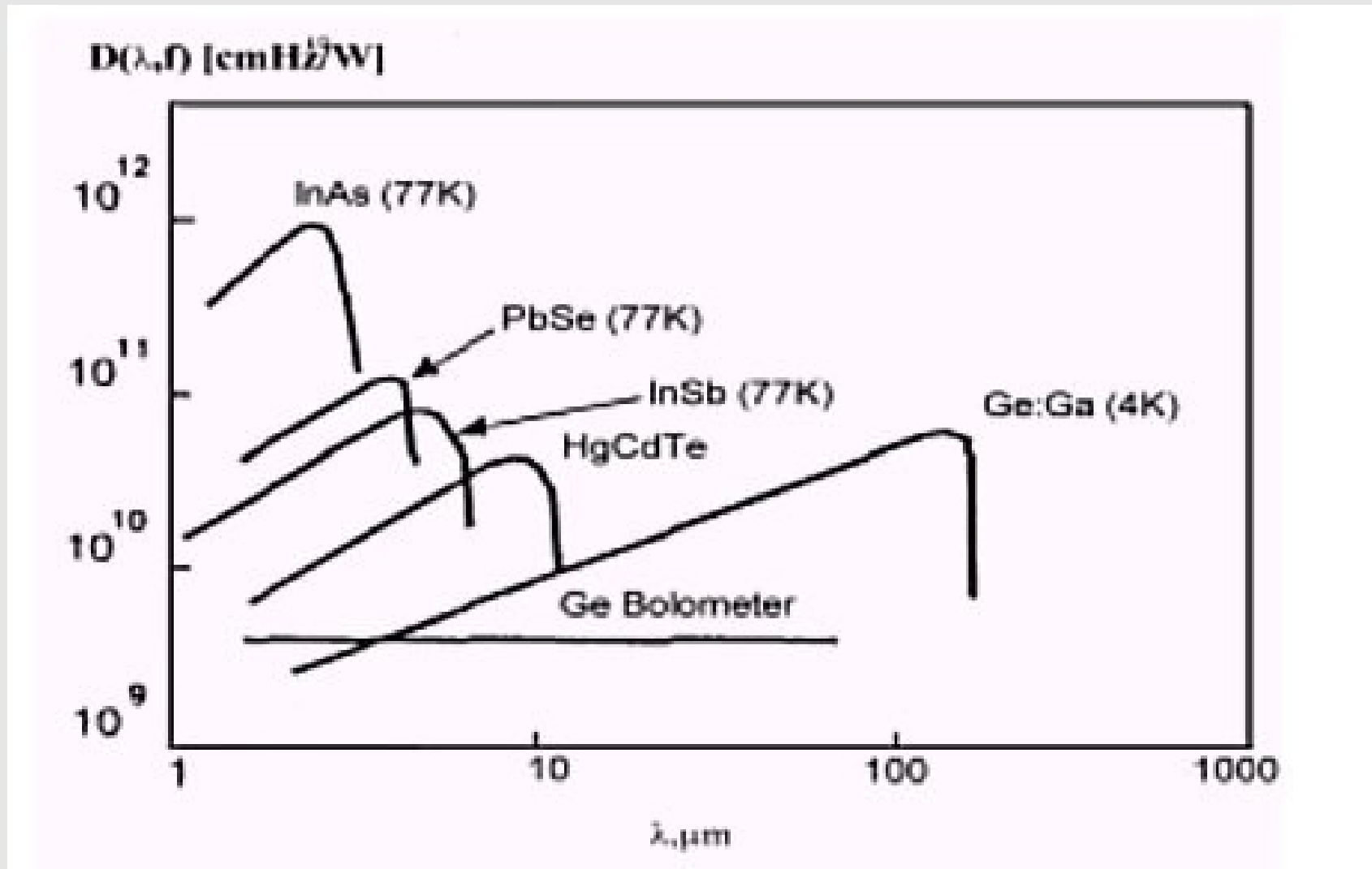
Detektory promieniowania

- **pojedyncze** (termometry)
- **matryce detektorów** (kamery)
 - bolometryczne
 - termoelektryczne
 - piroelektryczne
 - kwantowe

Stos termoelektryczny



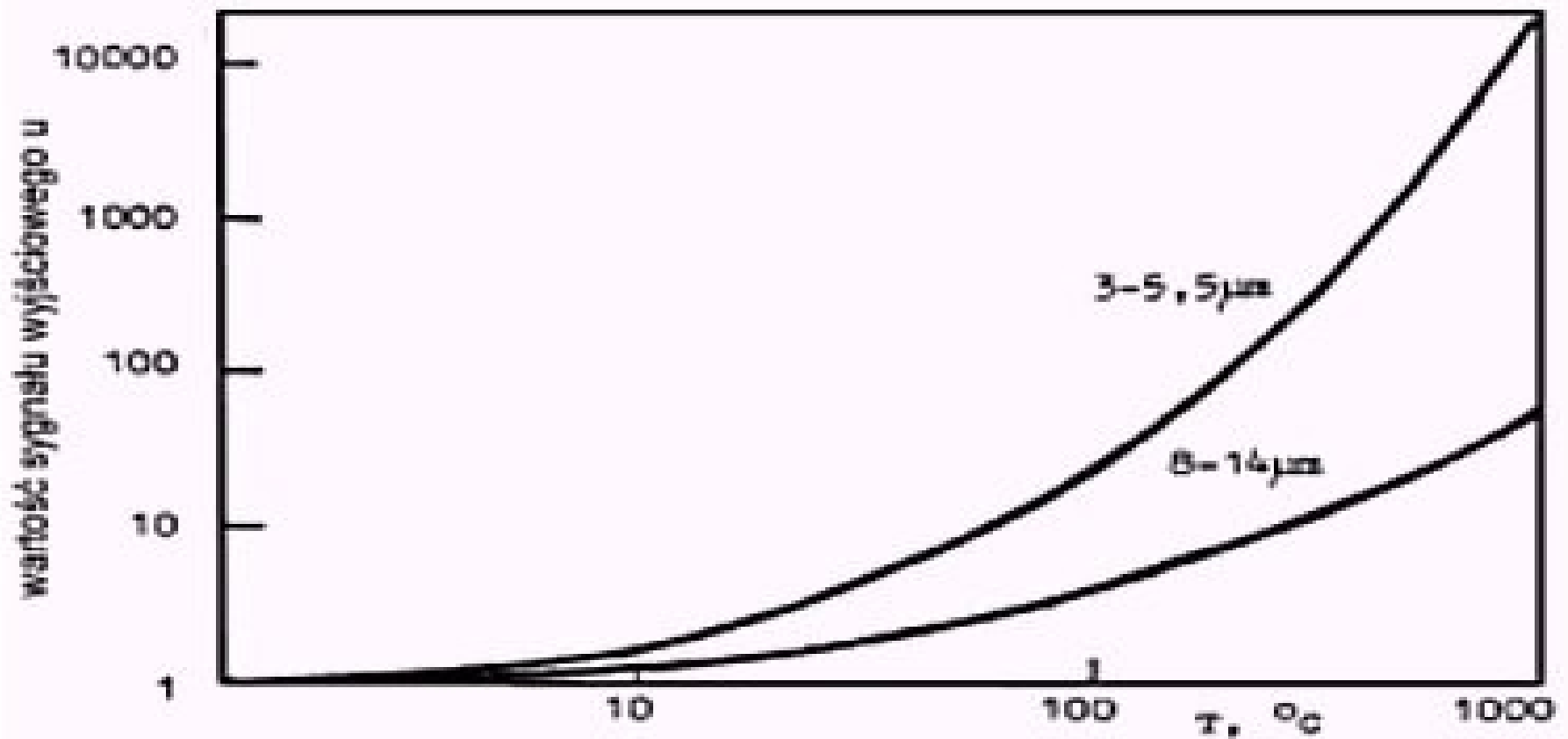
Czułość detektorów fotonowych



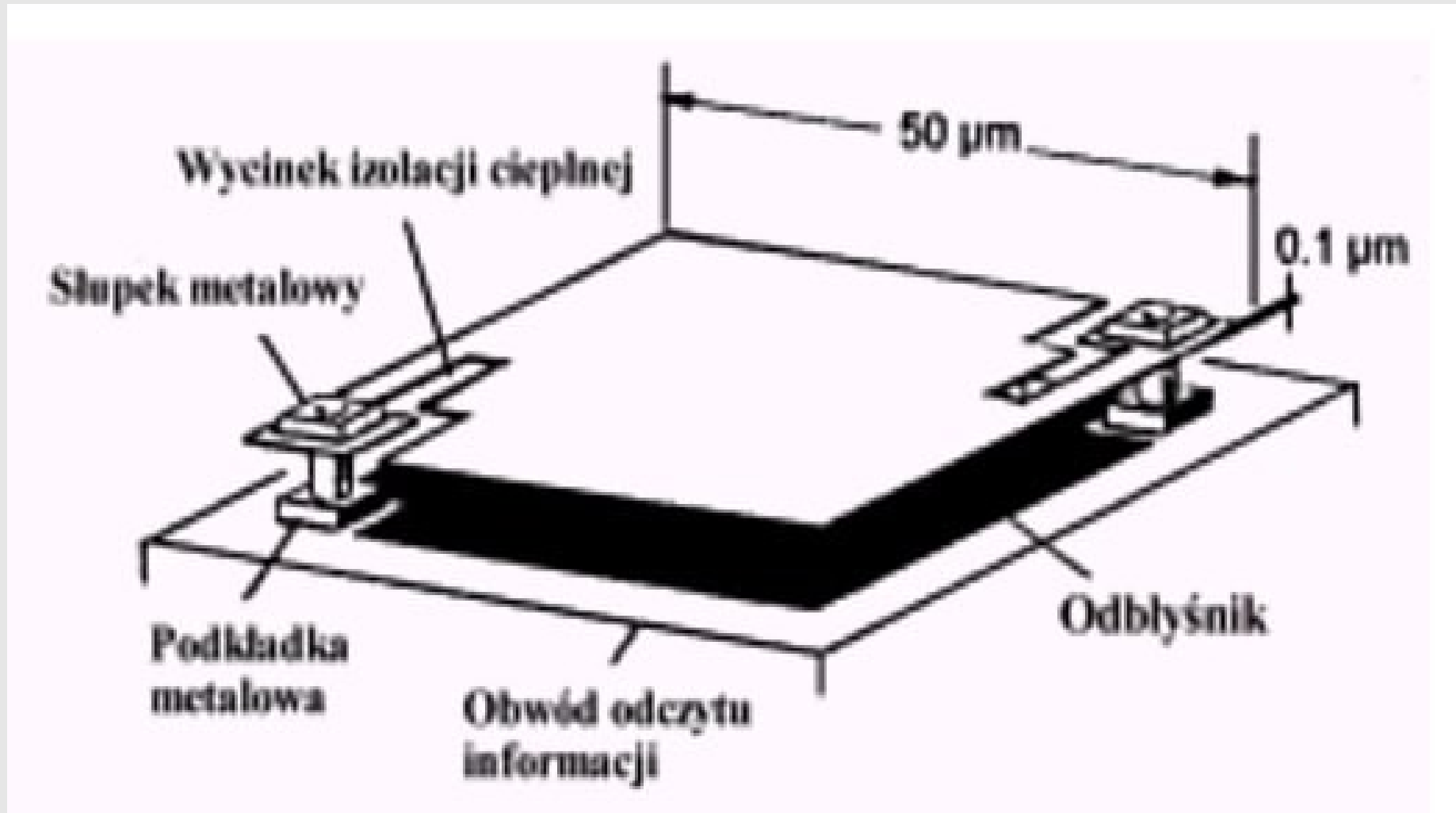
*Porównanie czułości detektorów
promieniowania*

Charakterystyki statyczne

Detektorów promieniowania termometru radiacyjnego

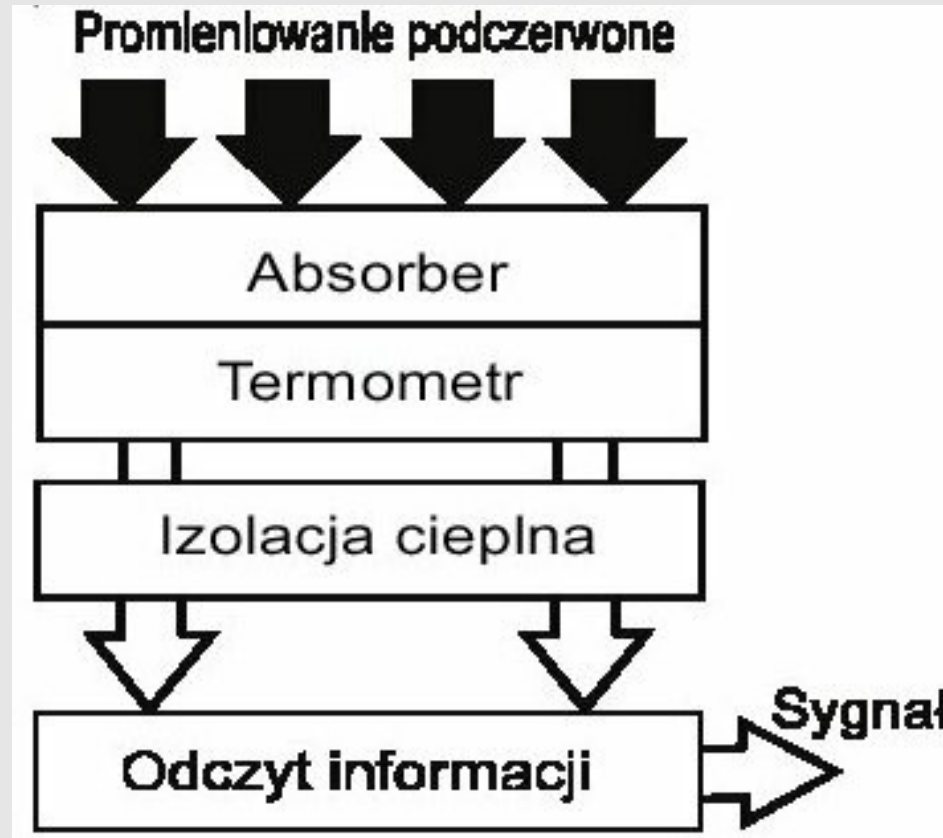


Detektor niechłodzony



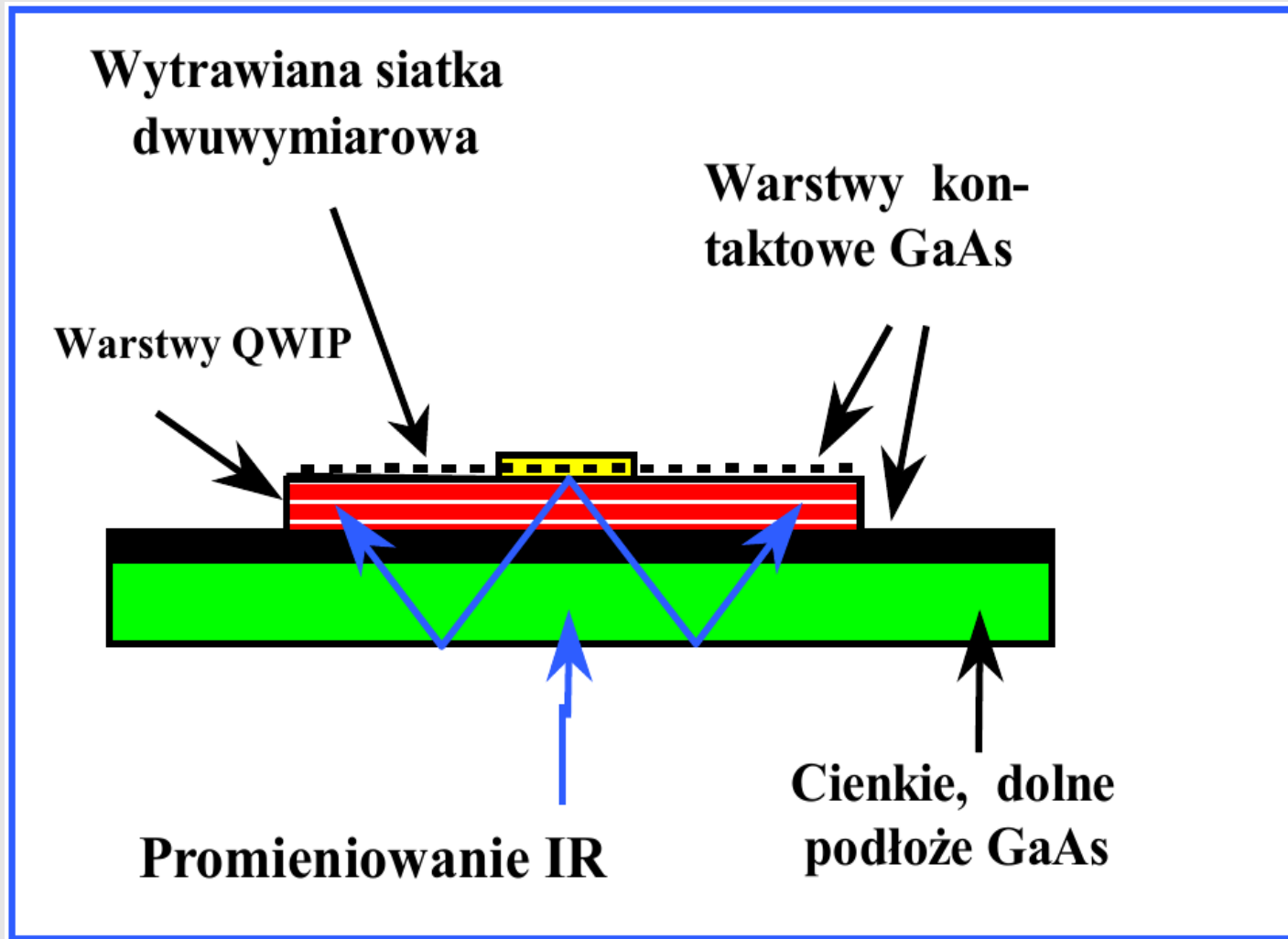
Pojedynczy piksel matrycy

Przetwarzanie sygnału



Schemat blokowy

Detektor kwantowy QWIP



Piksel matrycy QWIP o wymiarach 30 x 30 μm

Detektory QWIP należą obecnie do najbardziej zaawansowanych na świecie. W zakresie dalszych badań nad detektorami kwantowymi planuje się stworzenie większych matryc, np. 640x480 pikseli – obecny standard to 320x240 pikseli, oraz opracowanie detektorów dwubarwowych, t.j. scalonych detektorów krótkofalowych i długofalowych.

Obecnie są to najczulsze detektory o temperaturowej zdolności rozdzielczej: 20-40mK, dlatego stosowane są głównie do badań naukowych.

Największą czułość widmową mają w paśmie długofalowym (LW) 8-9 μm o bardzo wąskiej szerokości 1 μm . Ich cechą charakterystyczną jest stosunkowo wysoka jednorodność poszczególnych elementów (pikseli) matrycy.

Rejestracja obrazu odbywa się z dynamiką 14 bitową, tj. gwarantują możliwość uzyskania rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych (A/C) równą $2^{14}=16384$.

Termometry radiacyjne

krótkofalowe (3-5 μm) pracujące w pierwszym oknie atmosferycznym

długofalowe (8-14 μm) pracujące w drugim oknie atmosferycznym

- chłodzone sprężonym argonem
- chłodzone ciekłym azotem
- chłodzone systemem Stirlinga (hel)
- nie chłodzone

Technika pomiarów

- wpływ atmosfery
- wpływ temperatury otoczenia na wskazania kamery termowizyjnej
- pomiar kamerą krótkofalową oraz długofalową
- niepewność spowodowana brakiem możliwości uśredniania wyników pomiarów, a tym samym redukcji szumu detektora, związana z wymaganiami dotyczącymi szybkości pomiaru w kamerach.

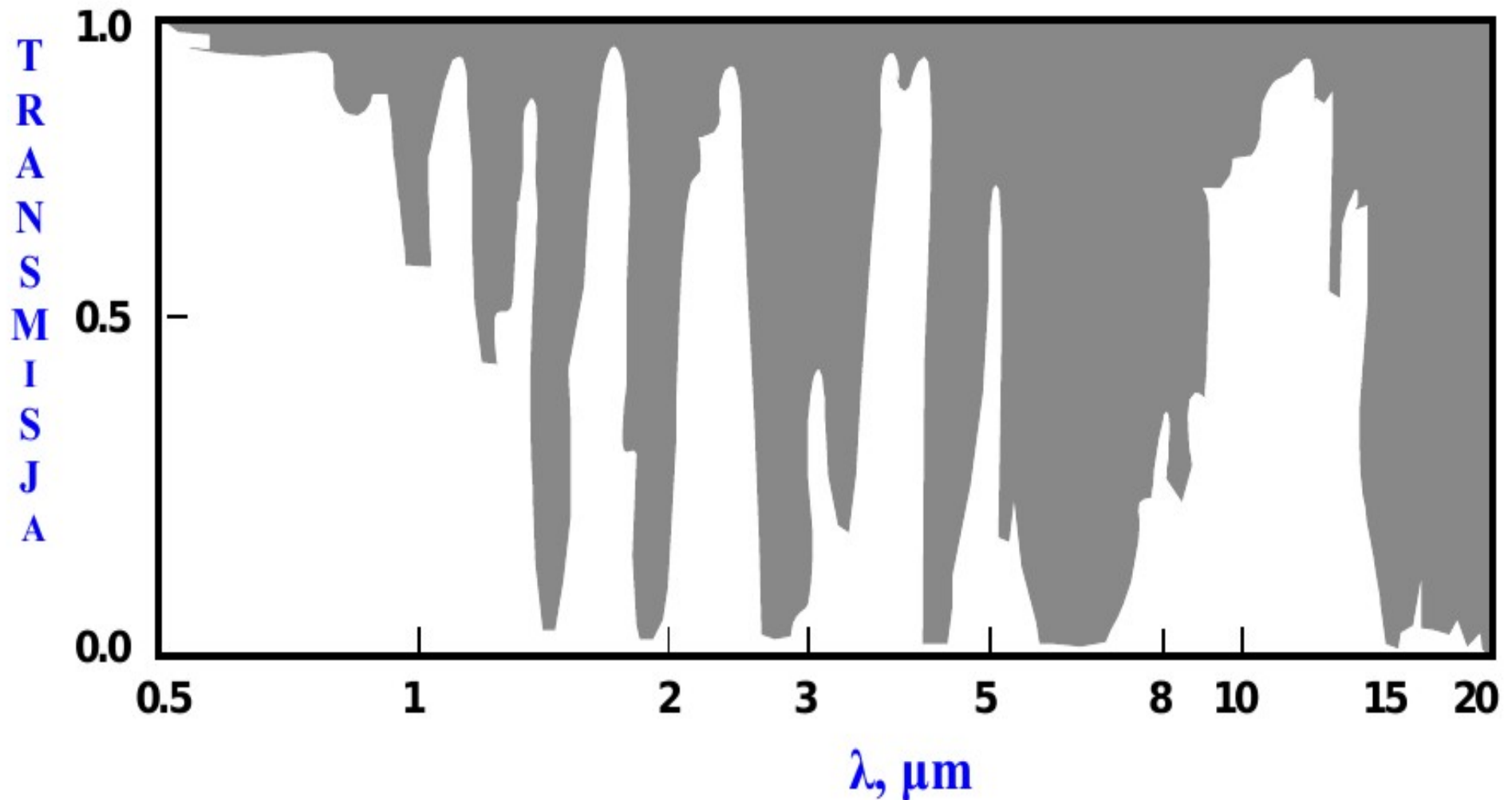
Niepewność pomiaru

- Niepewności metody
- Niepewności warunków pracy
- Niepewności toru elektronicznego

Niepewność metody

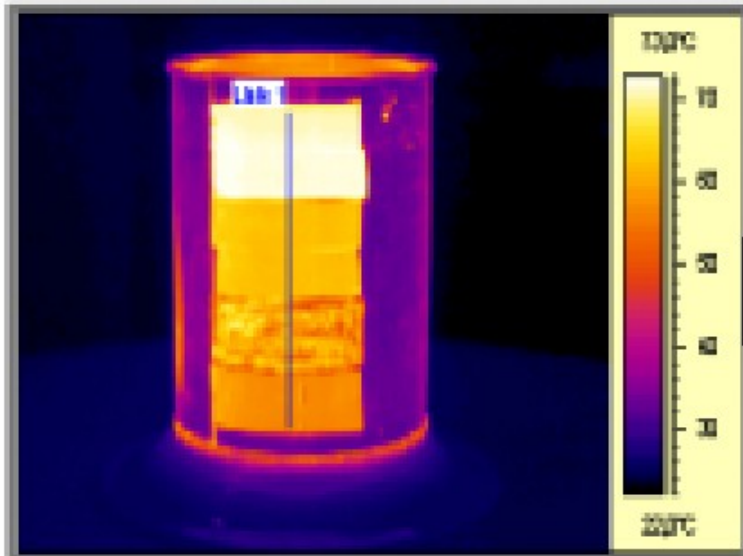
- Niepewność oszacowania emisyjności ε obiektu,
- niepewność spowodowana wpływem odbitego przez obiekt promieniowania otoczenia oraz wpływem promieniowania samego otoczenia,
- niepewność spowodowana ograniczoną transmisją atmosfery oraz jej promieniowaniem (emisją).

Przepuszczalność atmosfery

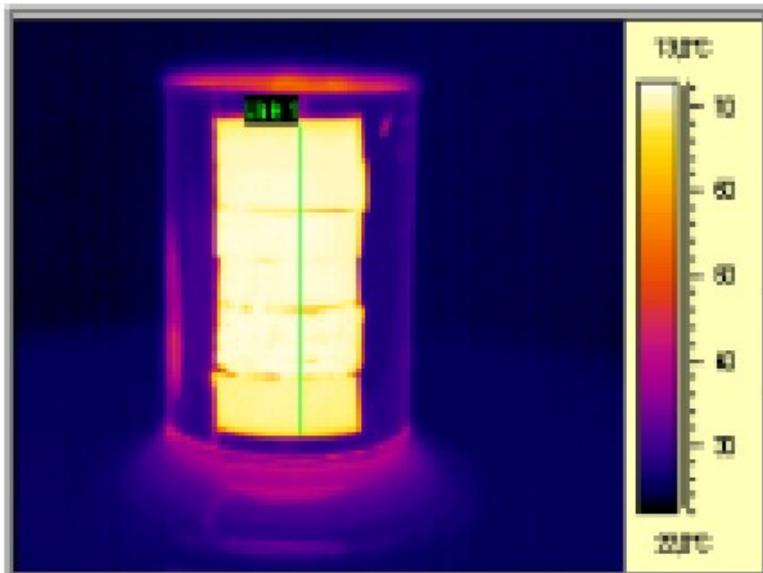
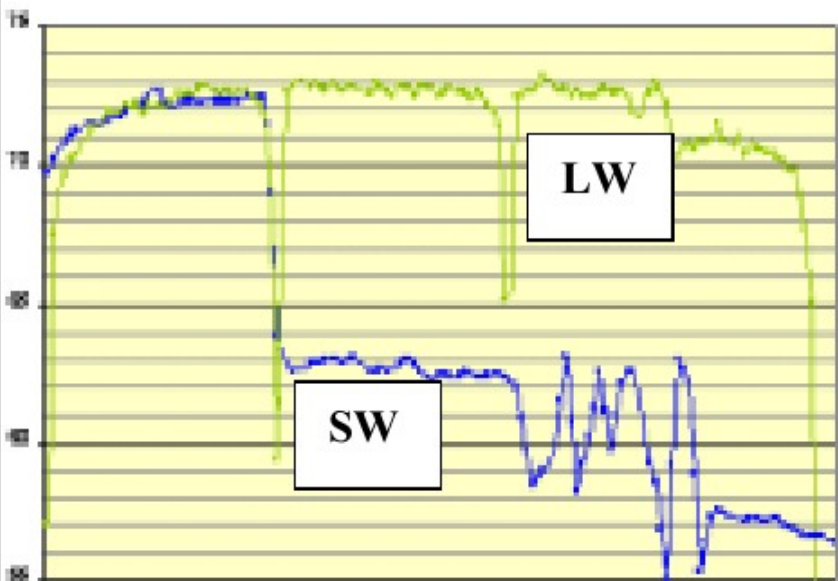


Przepuszczalność promieniowania podczerwonego warstwy atmosfery ziemskiej w funkcji długości fali

Która kamera jest lepsza, krótkofalowa czy długofalowa?

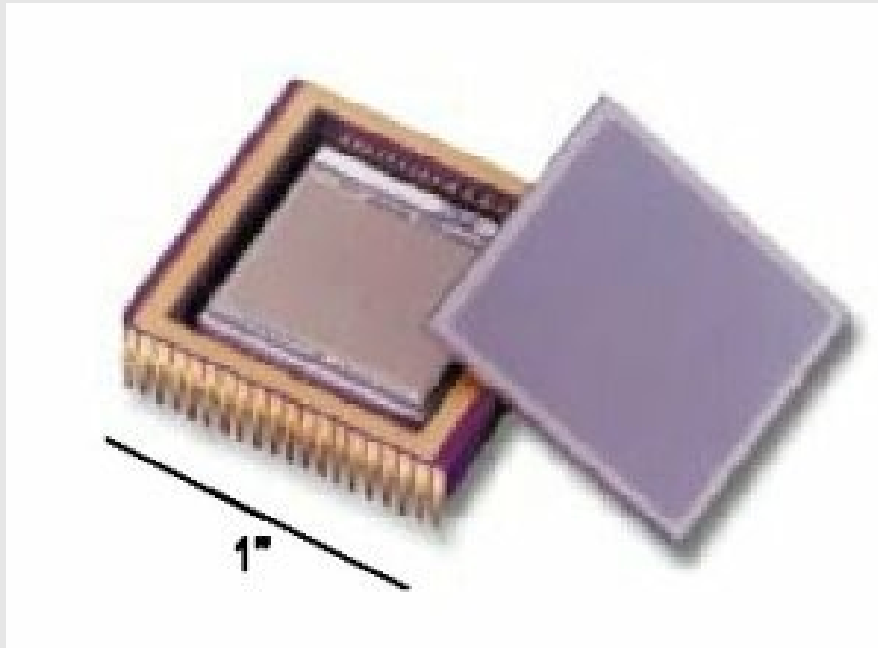


SW: 3,6-5μm



LW: 8-12μm

Wygląd matrycy detektorów - przykład



Matryca detektorów o rozmiarach 320x240



Moduł kamery obserwacyjnej

Model ThermaCAM PM 695 firmy FLIR

- Nie chłodzona, bolometryczna kamera pomiarowa rejestrująca w obu pasmach widzialnym i podczerwieni. Zakres do +1500/2000 °C. Rejestracja cyfrowa termogramów, zdjęć w paśmie widzialnym (wbudowany, cyfrowy aparat fotograficzny), cyfrowego komentarza głosowego. Pełna obróbka komputerowa danych. Kamera długofalowa (7,5 - 13 μm).



Model ThermaCAM SC 500 firmy FLIR

Bolometryczna, nie chłodzona jednostka pomiarowa z pełną rejestracją i obróbką danych. Możliwość podłączenia do komputera przez interface PCMCIA.

Główne przeznaczenie: medycyna, prace naukowo-badawcze. Kamera długofalowa (7,5 - 13 μm).

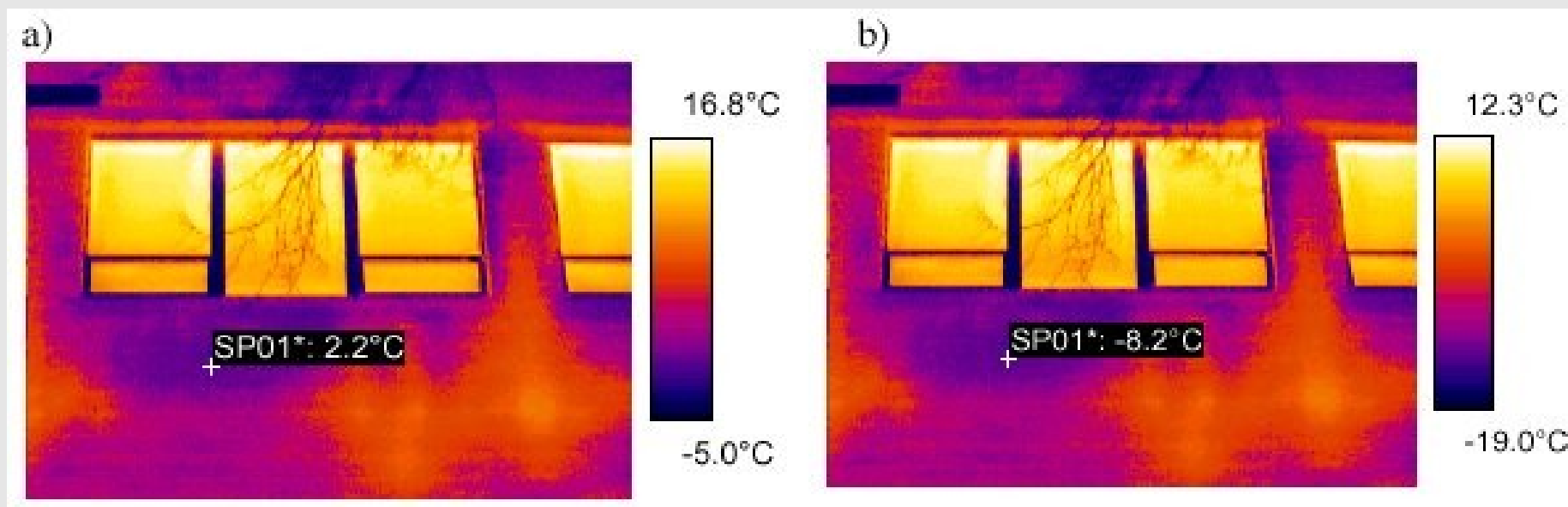




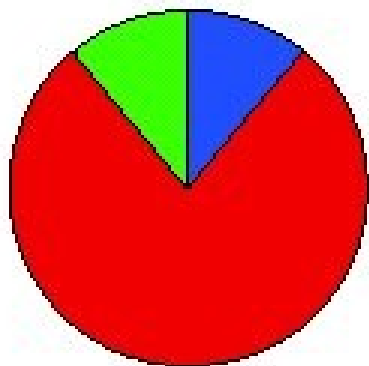
Seria TVS - 2000 Mk II firmy AC

- kamery chłodzone sprężonym argonem:
 - TVS - 2100 Mk II (-40 ~ 950°C)
 - TVS - 2200 Mk II (-40 ~ 2000°C)
- kamery chłodzone systemem Stirlinga:
 - TVS - 2100 Mk II ST (-20 ~ 950°C)
 - TVS - 2200 Mk II ST (-20 ~ 2000°C)
- chłodzona systemem Stirlinga, długofalowa:
 - TVS - 2000 Mk II LW (-40 ~ 300°C lub ~ 1000°C)

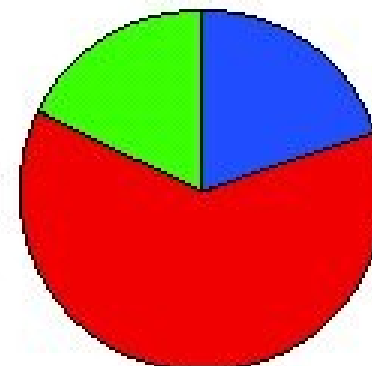
Wpływ temperatury otoczenia na wskazania kamery termowizyjnej



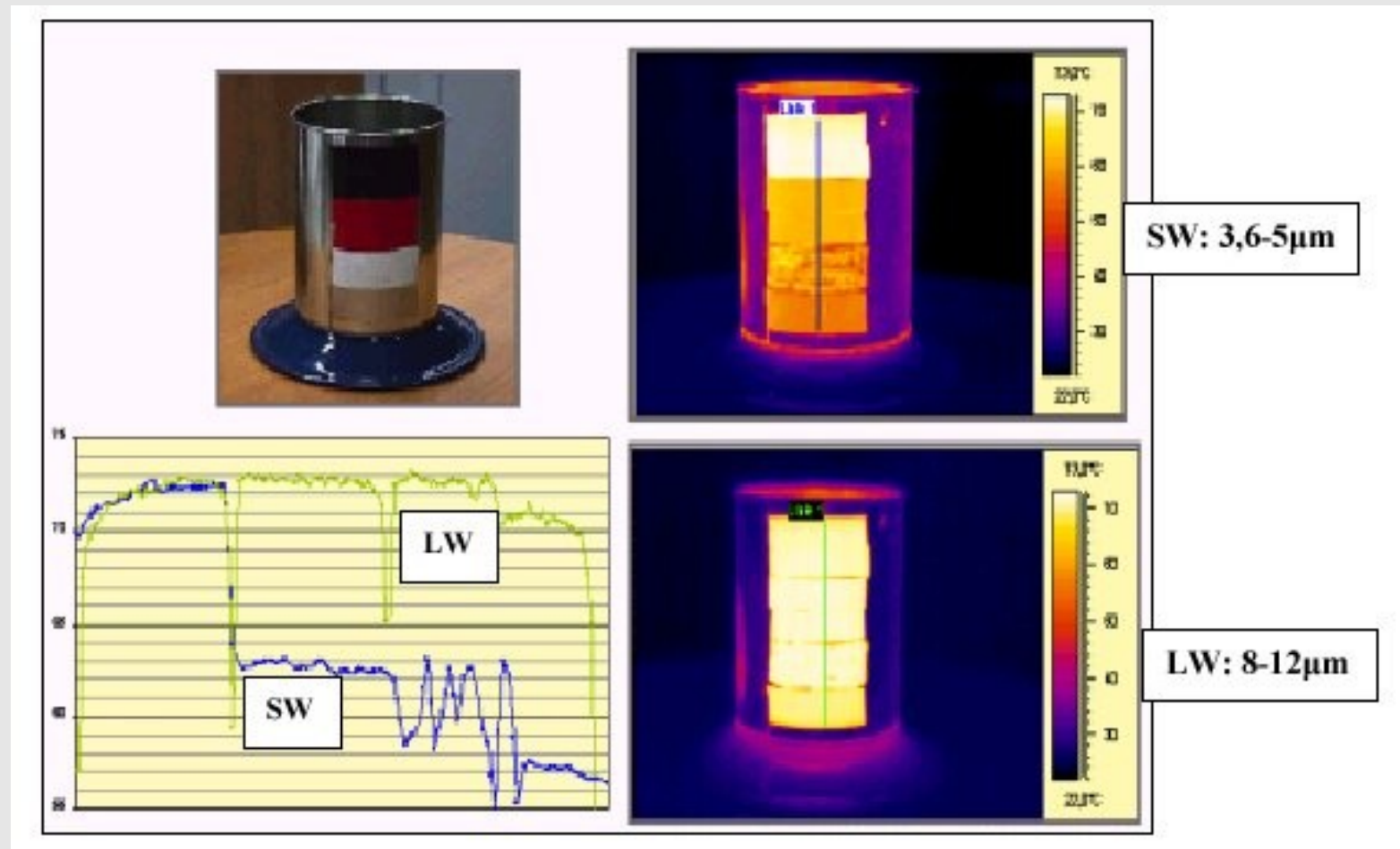
c) $T_{atm}=T_o=0^{\circ}C$; $T_{ob}=+2,2^{\circ}C$



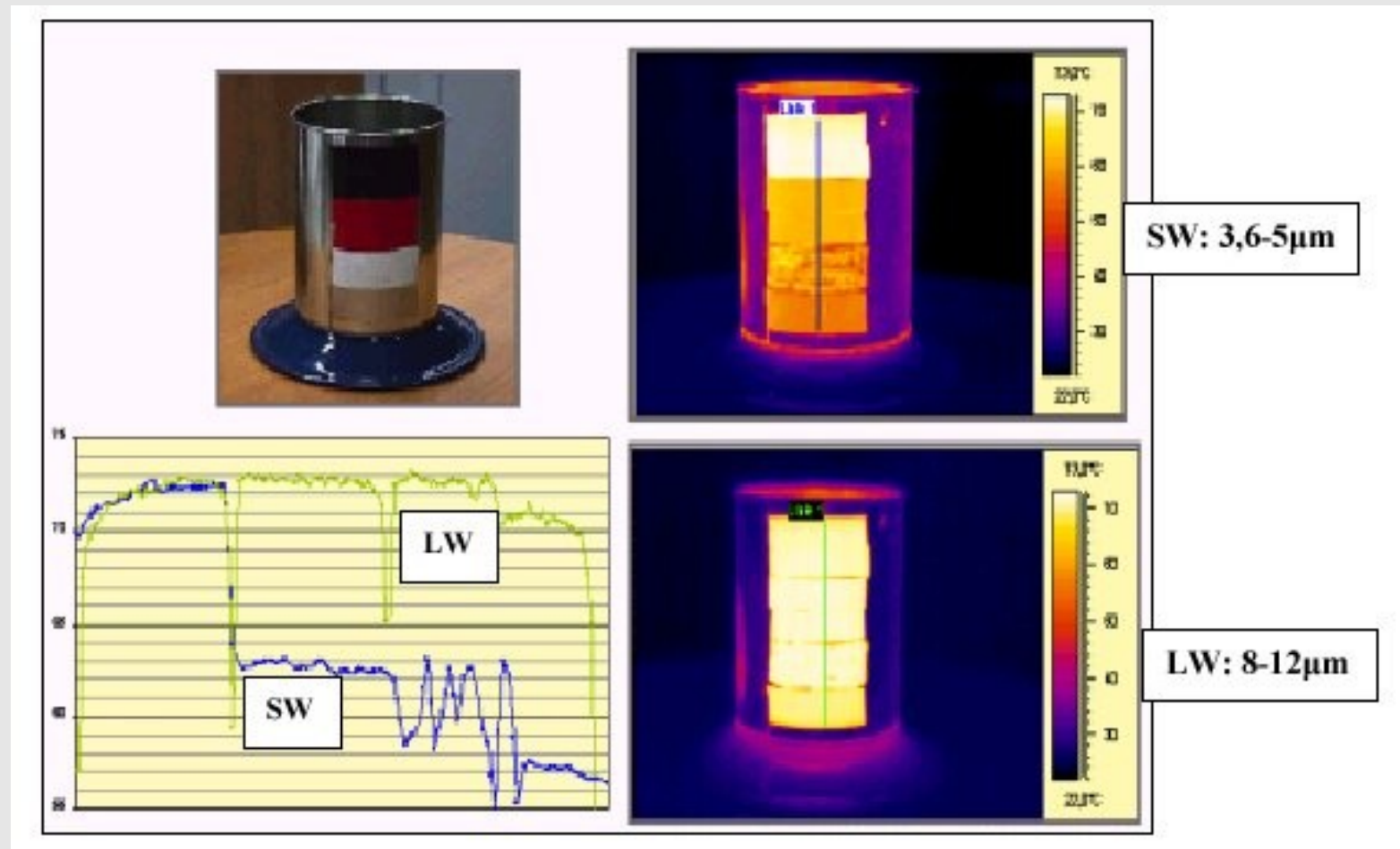
d) $T_{atm}=T_o=20^{\circ}C$; $T_{ob}=-8,2^{\circ}C$



Pomiary z zastosowaniem kamery krótkofalowej oraz długofalowej



Pomiary z zastosowaniem kamery krótkofalowej oraz długofalowej



Przykładowe termogramy

- budownictwo
- hutnictwo
- elektroenergetyka

