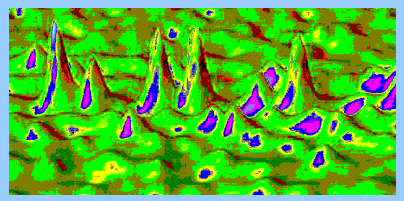
Detekcja światła

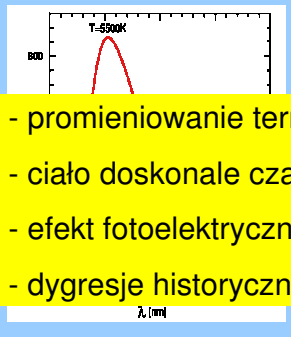


Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl
Biuro: **365**, telefon: **611-3250**

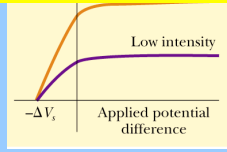
Konsultacje: **czwartek 13-16**

Repeta z wykładu nr 2



- promieniowanie termiczne
- ciało doskonale czarne, model Plancka
- efekt fotoelektryczny, model Einsteina
- dygresje historyczne

$$R(\nu,T)=\frac{2\pi h\nu^3}{c^2}\frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT})-1}$$



Co to jest detektor?

urządzenie, w którym pod wpływem absorpcji promieniowania elektromagnetycznego zmieniają się jego właściwości

detektory światła

detektory termiczne
pomiar odbywa się poprzez detekcję zmiany temperatury w wyniku absorpcji światła

detektory fotonowe
promieniowanie powoduje zmianę obsadzenia poziomów energetycznych

Parametry fotodetektorów

Wydajność kwantowa (quantum efficiency) (η) – liczba elektronów wytwarzanych przez jeden foton podający na powierzchnię światłoczułą detektora
$\eta=(n_e/n_p)*100\%$
n_e-częstość z jaką wytwarzane są elektrony
n_p-częstość z jaką padają fotony

Czułość (responsivity) – jest związana z wydajnością kwantową i dotyczy odpowiedzi fotodetektora na określony strumień fotonów
$R=I/\Phi$
I – prąd wyjściowy fotodetektora
Φ – strumień padających fotonów

Parametry fotodetektorów

dla światła o długości fali λ:

$\Phi = n_p hc/\lambda$

z kolei:

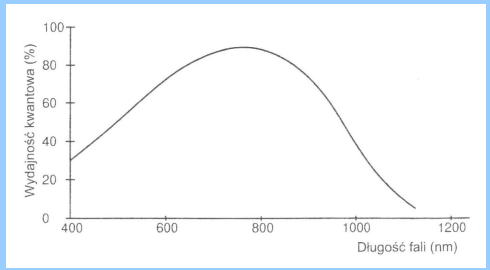
$I = n_e q$

wówczas wartość prądu: $I = (\eta \Phi \lambda q)/hc$
a czułość: $R = I/\Phi = (\eta \lambda q)/hc$

znając wydajność kwantową dla określonej długości fali można wyznaczyć czułość detektora

Parametry fotodetektorów

Charakterystyka widmowa – zależność wydajności kwantowej od długości fali padającego promieniowania



fotodioda krzemowa

Parametry fotodetektorów

Moc równoważna szumu (Noise equivalent power) (NEP) – wartość skuteczna mocy monochromatycznego promieniowania o długości fali λ podającego na detektor, która daje na wyjściu sygnał odpowiadający poziomowi szumu

$$\frac{\text{sygnał}}{\text{szum}} = \frac{S}{N} = 1$$

im mniejszy NEP tym lepiej

NEP zależy od rodzaju detektora i co z tym związane rodzaju występujących szumów

Parametry fotodetektorów

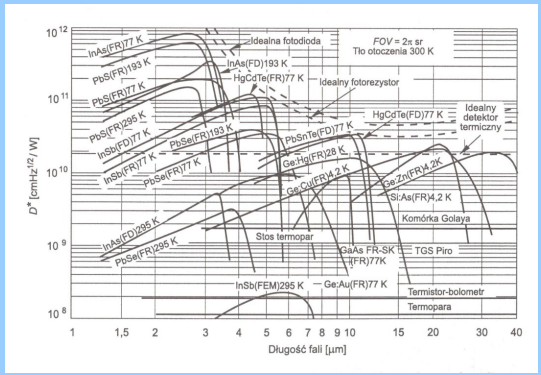
Detekcyjność/wykrywalność (detectivity) (D*) – odwrotność NEP

$$D^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP}$$

A – aktywna powierzchnia detektora
Δf – szerokość pasma

Parametry fotodetektorów

Charakterystyka widmowa – zależność wydajności kwantowej od długości fali padającego promieniowania



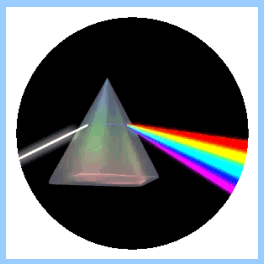
Detektory termiczne

Detektor	Tryb pracy
Bolometr Metaliczny Półprzewodnikowy Nadprzewodzący Ferroelektryczny Na „gorących nośnikach”	Zmiana przewodnictwa elektrycznego
Termopara	Generacja napięcia na złączu dwóch różnych materiałów spowodowana zmianą temperatury
Piroelektryczny	Zmiana spontanicznej polaryzacji elektrycznej
Komórka Golaya	Termiczne rozprężanie gazu
Z absorpcją krawędziową	Transmisja optyczna półprzewodnika
Piromagnetyczny	Zmiana właściwości magnetycznych
Ciekłokrystaliczny	Zmiana właściwości optycznych

λ ~ 1 μm do 0.1mm, szybkość odpowiedzi ~ 10 μs
szeroka i gładka charakterystyka widmowa
duży stosunek powierzchni do objętości
silna absorpcja i dobra izolacja termiczna od otoczenia

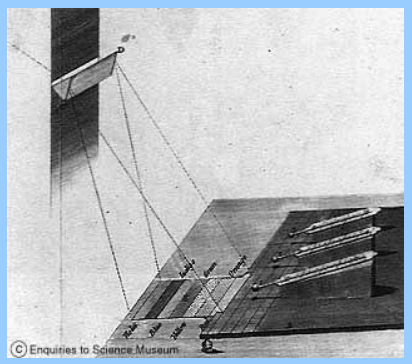
Detektory termiczne-historia

promieniowanie podczerwone – Friedrich Wilhelm Herschel w 1800 r. – obserwacja promieniowania rozszczepionego przez pryzmat



Detektory termiczne-historia

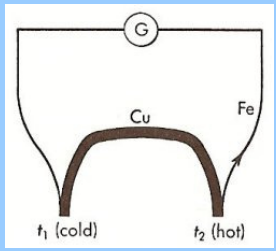
promieniowanie podczerwone – Friedrich Wilhelm Herschel w 1800 r. – obserwacja promieniowania rozszczepionego przez pryzmat



Detektory termiczne-historia

efekt termoelektryczny – Thomas Johann Seebeck w 1821 r.

różnica temperatur pomiędzy dwoma materiałami (metalami lub półprzewodnikami) prowadzi do powstania siły elektromotorycznej



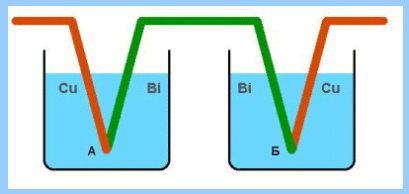
zasada działania termopary (thermocouple not thermovapor)
$\Delta V=\alpha_S \Delta T$

efekt Seebecka w kuchni:
www.youtube.com/watch?v=HSQ54Vo6Lzo

Detektory termiczne-historia

efekt Peltier - Jean Charles Athanase Peltier w 1834 r.

przepływ prądu przez złącze dwóch metali (lub półprzewodników) prowadzi do powstania różnicy temperatur



$Q=P\ q = P\ I\ t$

P-współczynnik Peltier $P=P(T)$

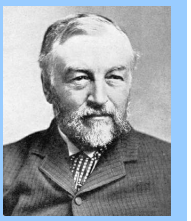
Detektory termiczne

efekt Peltier – wartości współczynnika Peltier

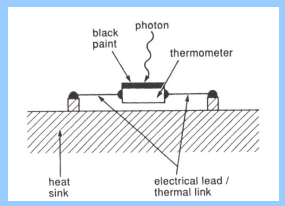
Peltier factors for different metal pairs					
Fe-constantan		Cu-Ni		Pb-constantan	
T, K	P, mV	T, K	P, mV	T, K	P, mV
273	13,0	292	8,0	293	8,7
299	15,0	328	9,0	383	11,8
403	19,0	478	10,3	508	16,0
513	26,0	563	8,6	578	18,7
593	34,0	613	8,0	633	20,6
833	52,0	718	10,0	713	23,4

Detektory termiczne-historia

pierwszy bolometr – Samuel Pierpont Langley w 1881 r.



działanie bolometru opiera się na pomiarze zmiany oporności (przewodnictwa) pod wpływem absorbowanego promieniowania



Bolometr

oporność bolometru:

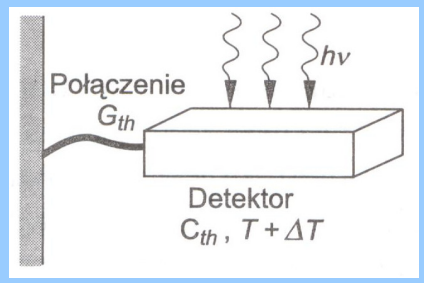
$$\rho=\rho_0(1+\alpha\Theta)$$

ρ_0 - oporność materiału w temperaturze 0^0C
Θ - temperatura wyrażona w ^{0}C
α - współczynnik zmian cieplnych oporności

dla metali $\alpha \sim 5x10^{-3}K^{-1}$

bolometry oparte na półprzewodnikach osiągają wartości α o rząd wielkości większe

Detektory termiczne



C_{th} - pojemność cieplna
G_{th} - przewodność cieplna

Detektory termiczne

absorpcja promieniowania -> wzrost temperatury

równanie bilansu ciepła:

$$C_{th}\frac{d\Delta T}{dt}+G_{th}\Delta T=\varepsilon\Phi$$

ΔT – zmiana temperatury
ε – emisyjność detektora
Φ – sygnał

Detektory termiczne

dla promieniowania padającego na detektor postaci

$$\Phi=\Phi_0 e^{i\omega t}$$

Φ_0 – amplituda

rozwiązanie w postaci

$$\Delta T=\Delta T_0 e^{-G_{th}/C_{th}\omega t}+\frac{\varepsilon\Phi_0 e^{i\omega t}}{G_{th}+i\omega C_{th}}$$

$$\Delta T=\frac{\varepsilon\Phi_0}{(G_{th}^2+\omega^2 C_{th}^2)^{1/2}}$$

C_{th} i G_{th} powinny być jak najmniejsze

Stała czasowa

dla dużych wartości ω: $\omega^2 C_{th}^2 > G_{th}^2$ ⟶ $\Delta T \sim \omega^{-1}$

termiczna stała czasowa: τ_{th}

$$\tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}} = C_{th} R_{th}$$

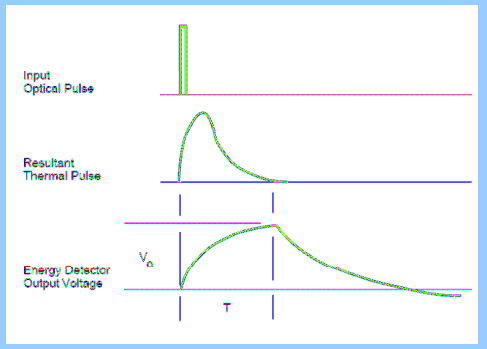
oporność termiczna $R_{th} = 1/G_{th}$

$$\Delta T = \frac{\varepsilon \Phi_0 R_{th}}{(1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

Stała czasowa

$$\Delta T = \frac{\varepsilon \Phi_0 R_{th}}{(1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

$\Delta T \sim \tau_{th}^{-1}$ – kompromis pomiędzy szybkością detekcji detektora termicznego a jego czułością



Detektory termiczne

parametr K – związek między zmianą temperatury a elektrycznym sygnałem napięciowym

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

sygnał wyjściowy wywołany zmianą temperatury

$$\Delta V = K \Delta T = \frac{K \varepsilon \Phi_0 R_{th}}{(1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

czułość (napięciowa) detektora

$$R_v = \frac{K \varepsilon R_{th}}{(1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

Detektory termiczne

$$R_v = \frac{K \varepsilon R_{th}}{(1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

dla niskich częstotliwości promieniowania ($\omega << 1/\tau_{th}$)
$R_v \sim R_{th}$ i niezależne od pojemności cieplnej
dla wysokich częstotliwości promieniowania ($\omega >> 1/\tau_{th}$)
$R_v \sim C_{th}$ i niezależne od rezystancji cieplnej

dla idealnie odizolowanego detektora zachodzi tylko wymiana radiacyjna z otoczeniem

$$R_v = \frac{K}{4\sigma T^3 A (1+\omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}$$

Termopara

dla termopary: $\Delta V = \alpha_s \Delta T$ $K = \alpha_s$

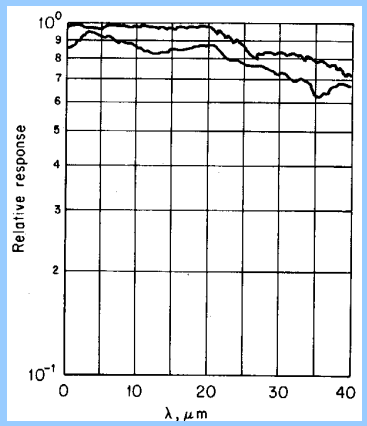
$$R_v = \frac{K\varepsilon R_{th}}{(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}} \rightarrow R_v = \frac{\alpha_s \varepsilon R_{th}}{(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}}$$

dla niskich częstotliwości promieniowania

$$R_v = \frac{\alpha_s \varepsilon}{G_{th}}$$

Termopara

spectral response



sensitivity: D*=1x10^9 Jones
resistance: 5 – 15 Ω
responsivity: 5V/W
time constant: 10 – 20 ms
active area : 0.1x1–0.3x3 mm
manufacturers: Perkin-Elmer, Charles Reeder, Beckman Instruments, Farrand, Eppley Laboratory, Barnes Engineering

Bolometr

dla bolometru: $a = \frac{1}{R_d}\frac{dR_d}{dT_d}$ współczynnik temperaturowy rezystancji
R_d-rezystancja bolometru

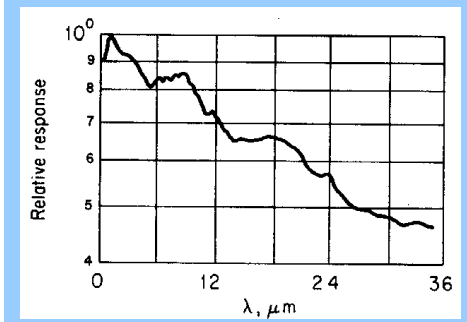
zmiana napięcia na bolometrze przy stałym I

$$\Delta V = I\Delta R_d = IR_d a \Delta T$$

$$R_v = \frac{IR_d a R_{th}\varepsilon}{(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}} \qquad \alpha_s \rightarrow IR_d a$$

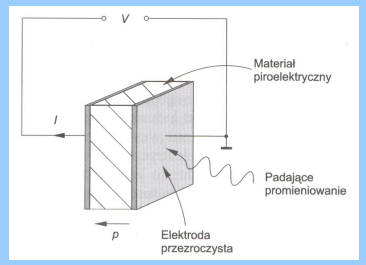
Bolometr

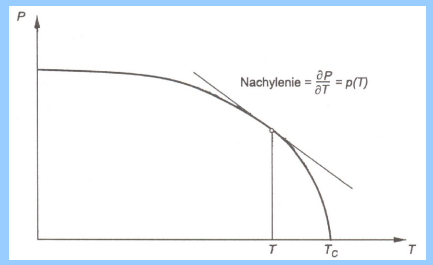
spectral response



active area: 0.1x0.1 ÷ 5 x 5 mm
quantum efficiency: ~80%
time constant: 1–20 ms
manufacturers: EDO / Barnes Engineering, Servo Corporation of America, Thermometrics

Detektor piroelektryczny





fotoprąd płynący przez detektor piroelektryczny

$$I_{ph} = Ap\frac{dT}{dt} = \frac{\varepsilon pA\Phi_0\omega}{G_{th}(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}}$$

Detektor piroelektryczny

czułość prądowa detektora

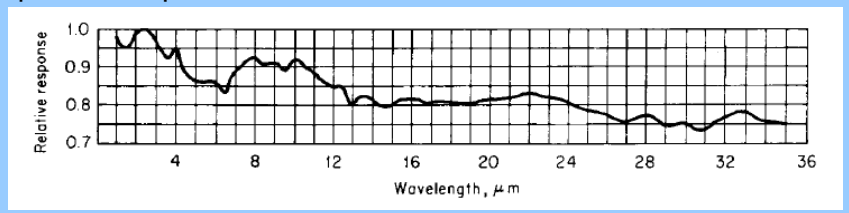
$$R_i = \frac{I_{ph}}{\Phi_0} = \frac{\varepsilon pA\omega}{G_{th}(1+\omega^2\tau_{th}^2)^{1/2}}$$

w granicy małych częstotliwości, ($\omega << 1/\tau_{th}$)

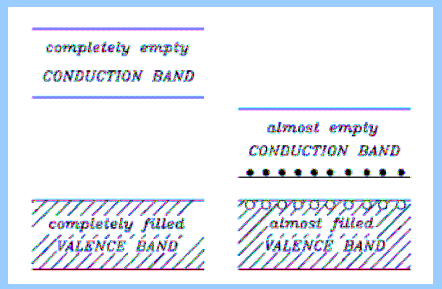
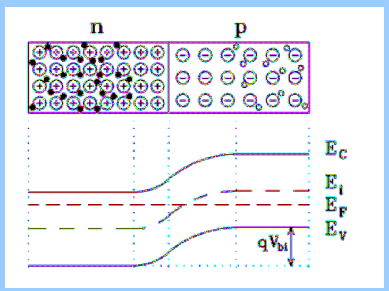
$$R_i = \frac{\varepsilon p}{c_{th}t}$$

Detektor piroelektryczny

spectral response



active area: 2 ÷ 50 mm in diameter round
10x10 mm square
quantum efficiency: >75%
time constant: 1–20 μs
manufacturers: Delta Developments, EG&G Heimann, Eltec, Electro-Optical Systems, Gentec, Oriel, Phillips, Spiricon

Plan na czwarty wykład

półprzewodniki: wprowadzenie i fizyka złącz