

Wykład IX

Detektory I

Rodzaje detektorów

1. Zjawiska fotonowe
 - 1.1. Zjawiska fotonowe wewnętrzne
 - 1.1.1. Wzbudzenie nadmiarowych nośników
 - 1.1.1.1. Fotoprzewodnictwo samoistne, domieszkowe
 - Zasilanie mikrofalowe
 - 1.1.1.2. Zjawisko fotowoltaiczne
 - Złącze $p-n$
 - Fotodiody lawinowa
 - Złącze $p-i-n$
 - Złącze Schottky'ego
 - Heterozłącze
 - 1.1.1.3. Zjawisko fotomagnetoelektryczne
 - 1.1.1.4. Zjawisko Dembera
 - 1.1.1.5. Fototranzystor
 - 1.1.2. Oddziaływanie z nośnikami swobodnymi
 - 1.1.2.1. Photon – drag
 - 1.1.2.2. Bolometr na gorących nośnikach
 - 1.1.2.3. Detektor Putley'a
 - 1.1.3. Oddziaływanie zlokalizowane
 - 1.1.3.1. Kwantowy licznik podczerwieni
 - 1.1.3.2. Fosfory
 - 1.1.3.3. Film fotograficzny
 - 1.2. Zjawiska fotonowe zewnętrzne (fotoemisyjne)
 - 1.2.1. Fotokatody
 - 1.2.1.1. Fotokatody konwencjonalne
 - 1.2.1.2. Fotokatody z ujemnym powinowactwem elektronowym
 - 1.2.2. Mechanizmy wzmacniające
 - 1.2.2.1. Powielanie gazowe
 - 1.2.2.2. Fotopowielacze
 - 1.2.2.3. Powielanie kanałowe elektronów

2. Zjawiska termiczne
 - 2.1. Bolometry
 - 2.1.1. Termistorowe
 - 2.1.2. Metalowe
 - 2.1.3. Nadprzewodzące
 - 2.1.4. Nadindukcyjne
 - 2.1.5. Półprzewodnikowe (niskie temperatury)
 - 2.2. Piroelektryczne
 - 2.3. Termoelektryczne
 - 2.4. Komórka Gołaya
 - 2.5. Detektor pneumatyczny z mikrofonem pojemnościowym
 - 2.6. Piromagnetyczne
 - 2.7. Nernsta
 - 2.8. Ciekłokrystaliczne
 - 2.9. Ewaporograf
3. Oddziaływania falowe
 - 3.1. Optyczna detekcja heterodynowa
 - 3.2. Optyczne przetwarzanie parametryczne
 - 3.2.1. Przetwarzanie z podwyższeniem częstotliwości
 - 3.2.2. Przetwarzanie z obniżeniem częstotliwości
 - 3.3. Fotoefekt w złączu Josephsona
 - 3.4. Fotodiody metal – tlenek metalu – metal

J. Piotrowski i in. „Półprzewodnikowe detektory podczerwieni” WNT (1985).

Parametry detektorów

Sygnal na wyjściu detektora zależy od długości fali (λ), powierzchni światłoczułej (A) i częstości modulacji (f), polaryzacji (niech opisuje to parametr b - bias) oraz mocy padającego promieniowania (P):

$$V = V (b, f, \lambda, P, A)$$

Parametry opisujące własności detektora powinny dać odpowiedź na cztery podstawowe pytania:

1. Jak zależy sygnał z detektora od długości fali promieniowania, czyli jak wygląda jego charakterystyka widmowa;
2. Jaka najmniejsza moc promieniowania padającego na detektor spowoduje pojawienie się na jego wyjściu sygnału równego szumom własnym detektora;
3. Jaką uzyska się wielkość sygnału, jeśli na detektor pada jednostkowa moc promieniowania;
4. Jak zachowuje się detektor przy modulacji promieniowania.

Wielkością ograniczającą stosowność detektora jest szum.

Ad. 1. Czulość napięciowa i charakterystyka widmowa

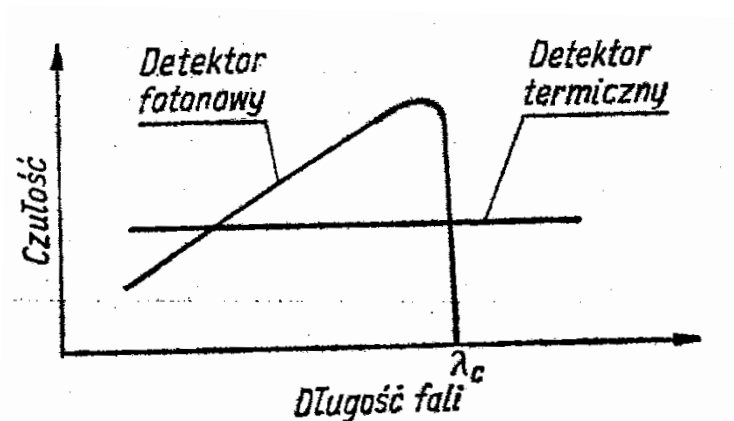
- Czulość napięciowa (prądowa) (ang. responsivity) - stosunek wartości skutecznej napięcia (prądu) sygnału wyjściowego o częstotliwości podstawowej do wartości skutecznej mocy promieniowania padającego o częstotliwości podstawowej:

$$R_V(b, f, \lambda) = \frac{V_s(b, f)}{P_\lambda \Delta \lambda} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{W}} \right]$$

$$R_i(b, f, \lambda) = \frac{I_s(b, f)}{P_\lambda \Delta \lambda} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{W}} \right]$$

gdzie $P_\lambda \Delta \lambda$ jest quasi monochromatyczną mocą promieniowania o długości fali λ , padającego na detektor.

Charakterystyka widmowa czulości (ang. spectral responsivity)




Ekwiwalentna moc szumów

Ad.2. Jaka najmniejsza moc promieniowania padającego na detektor spowoduje pojawienie się na jego wyjściu sygnału równego szumom własnym detektora?

Ekwiwalentna moc szumów (ang. noise equivalent power, NEP) jest to taka wartość skuteczna mocy promieniowania padającego na detektor, która daje na wyjściu sygnał o wartości skutecznej równej poziomowi szumu:

$$NEP(b, f, \lambda) = \frac{V_n(b, f) P_\lambda \Delta\lambda}{V_s(b, f, \lambda)}$$

Ponieważ $R_V(b, f, \lambda) = \frac{V_s(b, f)}{P_\lambda \Delta\lambda}$ 

$$NEP(b, f, \lambda) = \frac{V_n(b, f)}{R_V(b, f, \lambda)} = \frac{I_n(b, f)}{R_i(b, f, \lambda)} \quad [W]$$

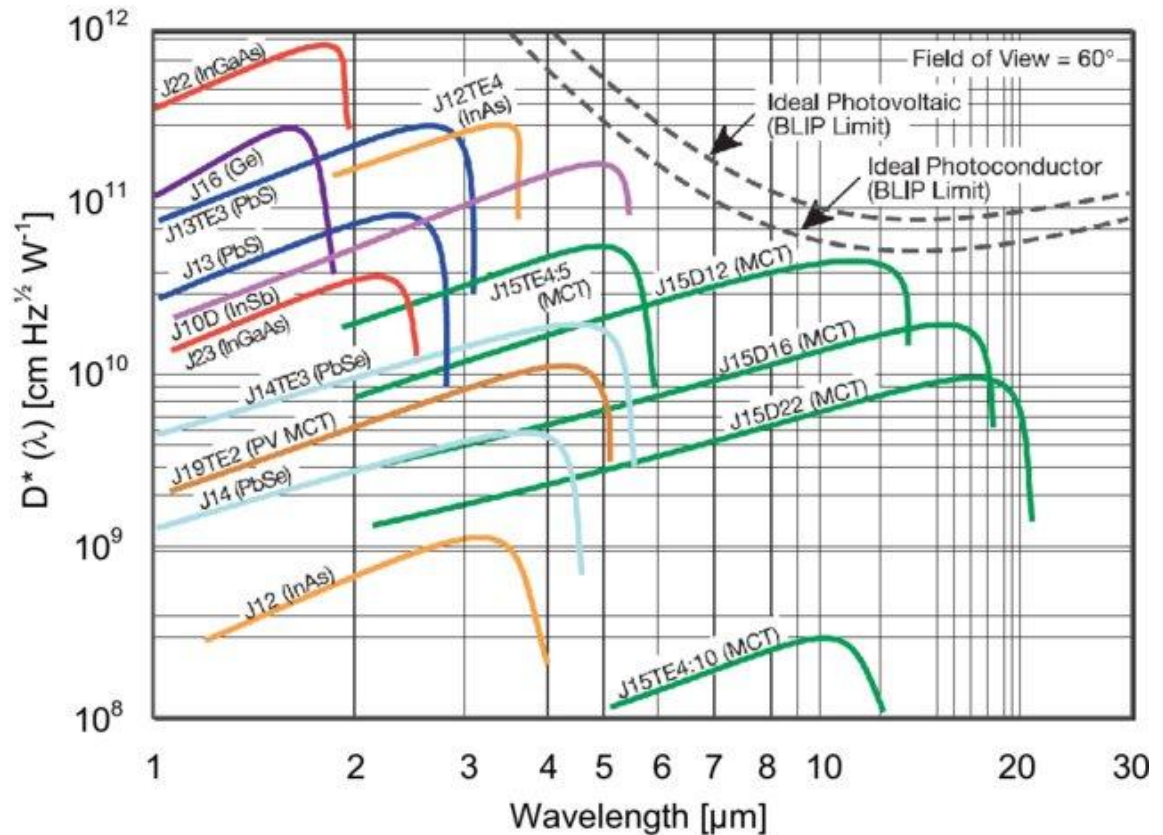
Jeśli NEP jest znormalizowana do jednostkowej szerokości pasma:

$$NEP(b, f, \lambda) = \frac{V_n(b, f) P_\lambda \Delta\lambda}{V_s(b, f, \lambda) \sqrt{\Delta f}} \quad \left[\frac{W}{\sqrt{Hz}} \right]$$

Detekcyjność

Ad.3. Jaką uzyska się wielkość sygnału, jeśli na detektor pada jednostkowa moc promieniowania?

Detekcyjność (ang. detectivity) znormalizowana, D^*_λ . Jest to stosunek sygnału do szumu odniesiona do jednostkowego strumienia promieniowania (padającego na jednostkę powierzchni detektora) i jednostkowej szerokości pasma przenoszenia:

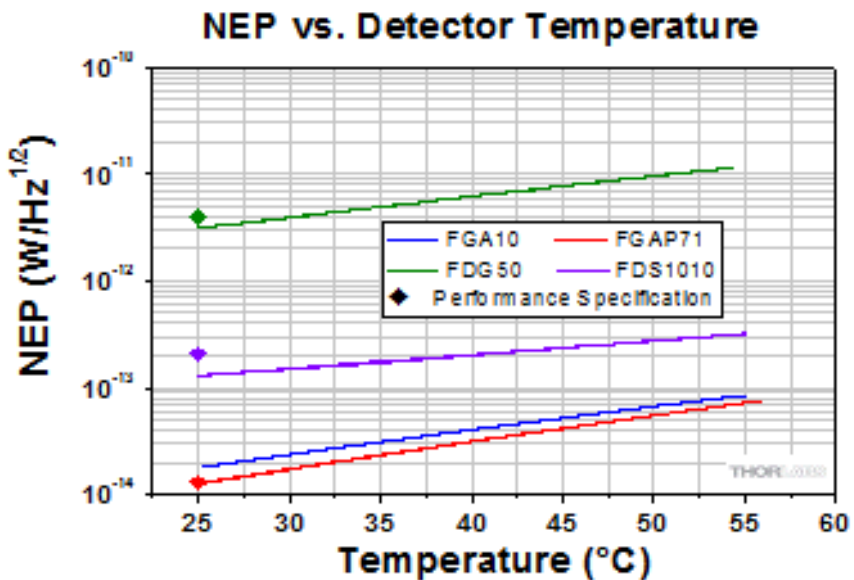


Granica detekcyjności przy założeniu, że jedyne szумы pochodzą z promieniowania tła (ang. Background Limited Performance, BLIP)
Pole widzenia detektora (ang. Field of View, FOV)

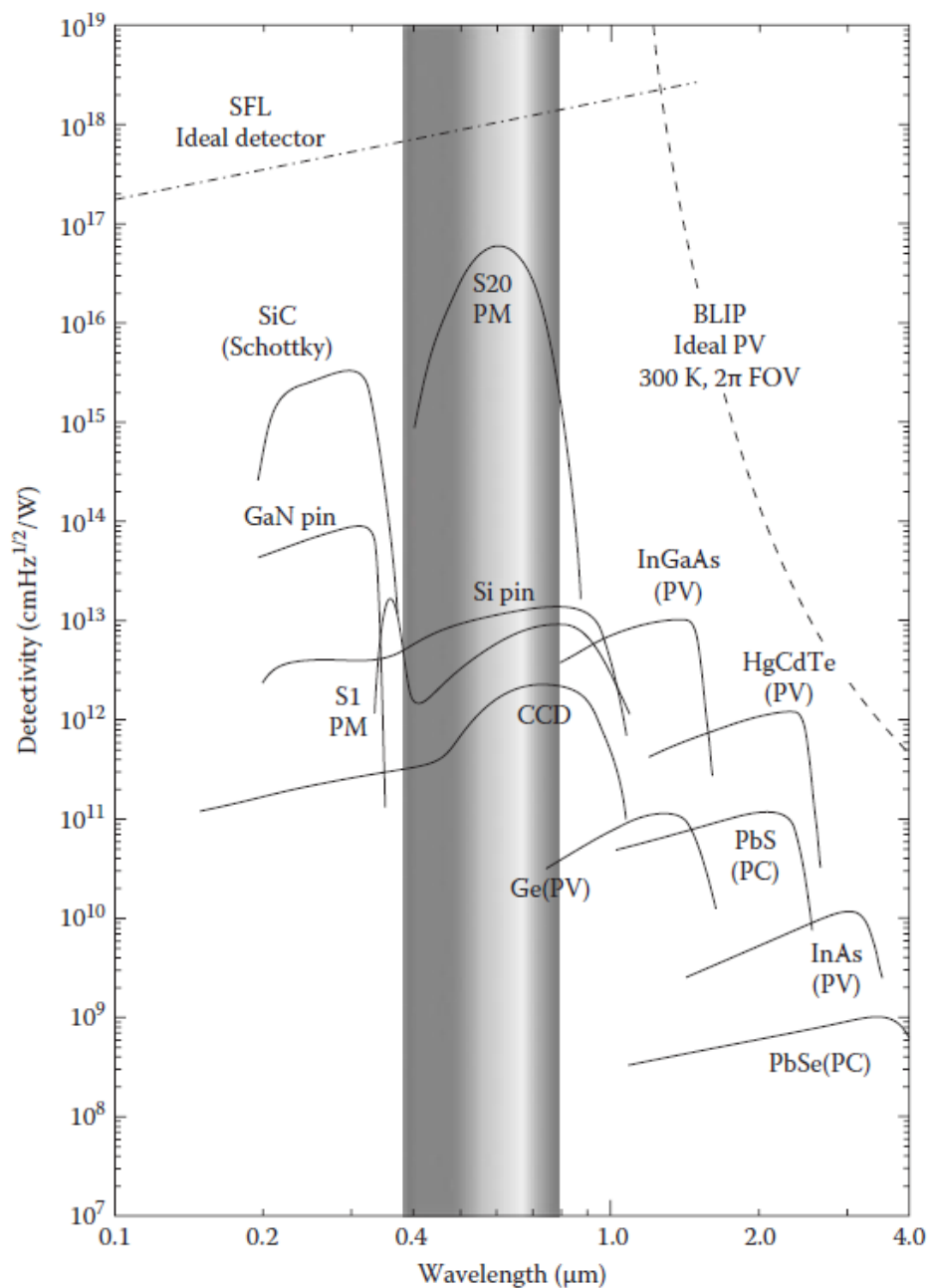
$$D^*_\lambda(b, f, \lambda) = \frac{\sqrt{A}}{NEP(b, f, \lambda)} = \frac{V_s(b, f) \sqrt{A \Delta f}}{V_n(b, f) P_\lambda \Delta \lambda} \quad \left[\frac{cm Hz^{1/2}}{W} \right]$$

NEP

Detekcyjność



THORLABS



A.Rogalski „Infrared detectors”
CRC PRESS 2010

Charakterystyka częstotliwościowa detektorów

Ad.4.

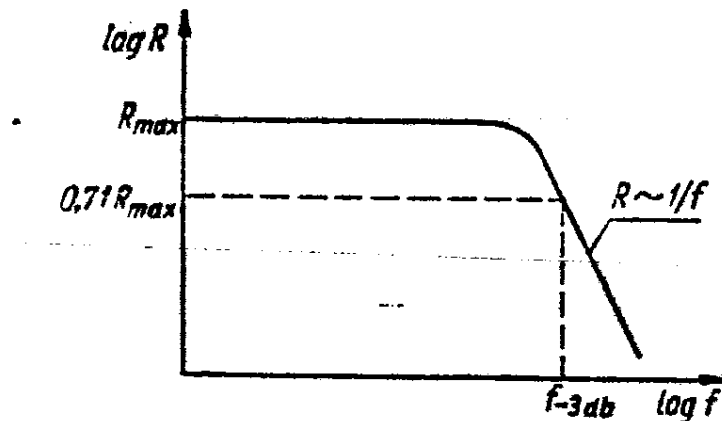
$$V_s(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}}$$

gdzie τ jest stałą czasową detektora:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{-3db}}$$

$$k \text{ (dB)} = 10 \log(P_{wy}/P_{we}) = 20 \log(V_{wy}/V_{we})$$

$$-3 = 20 \log(R/R_{max}) \quad \longrightarrow \quad R = 10^{-3/20} R_{max} \cong 0,71 R_{max}$$

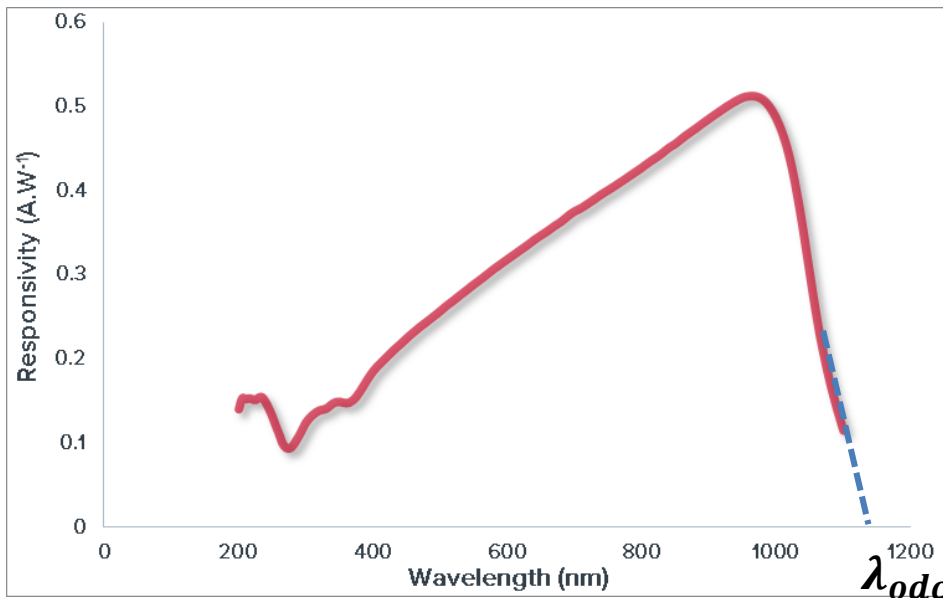


Charakterystyka widmowa czułości detektorów fotonowych

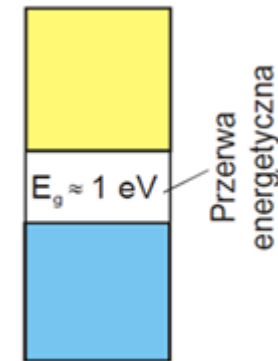
Fotoprąd:

$$i_{ph} = e\eta \frac{P}{hc} = e\eta \frac{P}{hc} \lambda$$

Wydajność kwantowa η : stosunek liczby elektronów do liczby fotonów



Czułość prądowa detektora Si



Fotoprąd pojawi się dla fotonów o energii:

$$E_f \geq \frac{hc}{\lambda_{odc}} = E_g$$

Szumy w detektorach fotonowych

Podział:

śrutowy,

Johnsona – Nyquista,

generacyjno – rekombinacyjny,

$1/f$,

inne (np.. modowy, laserowy)

Szum ńrutowy i Johnsona - Nyquista

Fotoprąd:

$$i_{ph} = e\eta \frac{P}{hc} = e\eta \frac{P}{hc} \lambda$$

- Szum ńrutowy – wywołany ziarnistością nońników prądu, występuje w detektorach, gdy płynie przez nie prąd. Moc szumu ńrutowego:

$$P_{śr} = i_n^2 R_L = 2e(i_{ph} + i_0)\Delta f R_L$$

gdzie Δf pasmo przenoszenia detektora a i_0 - prąd ciemny

- Szum termiczny Johnsona –Nyquista – wywołany ruchliwością nońników w $T>0$. Moc szumu termicznego:

$$P_{term} = 4kT\Delta f$$

Detektory termiczne

Detektory te opierają się na zjawiskach termicznych, czyli takich, w których następuje zmiana pewnych własności materiału spowodowana zmianą jego temperatury pod wpływem padającego promieniowania. Efekty te nie zależą od fotonowej natury padającego promieniowania. Dlatego też fotosygnal zależy tylko od mocy padającego promieniowania a nie zależy od długości fali.

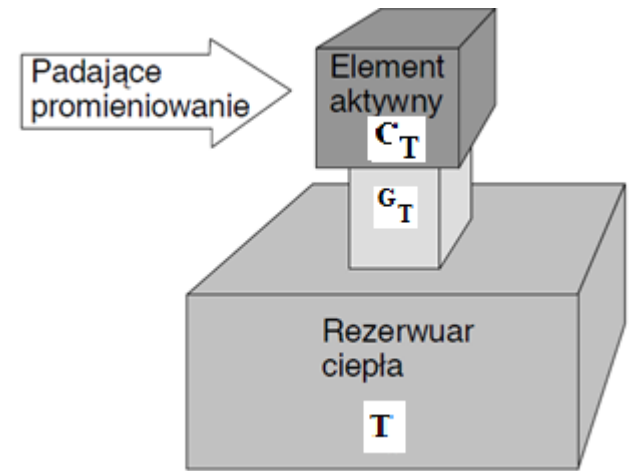
- Termopara
- Detektor piroelektryczny
- Bolometr
- Komórka Golay'a

W detektorach termicznych dominuje szum Johnsona-Nyquista

Detektory termiczne

Składają się z:

- elementu aktywnego o pojemności cieplnej C_T
- elementu o przewodności cieplnej G_T połączonego z rezerwuarem
- rezerwuaru ciepła (otoczeniem) o temperaturze T .



Wymiana ciepła z otoczeniem

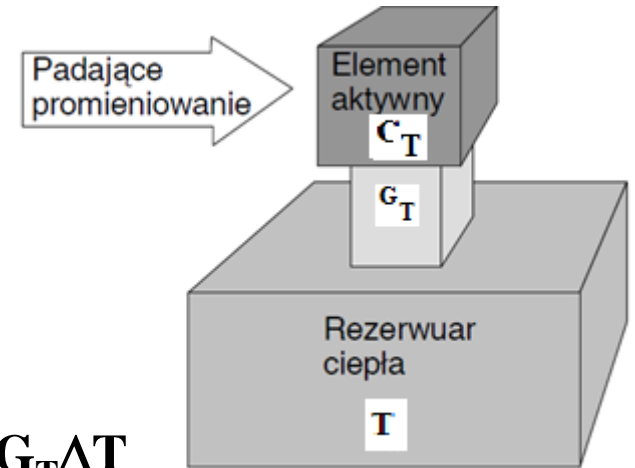
Jeśli ciało pochłonęło energię cieplną ΔQ to jego temperatura wzrośnie o ΔT :

$$\Delta Q = C_T \Delta T$$

Strumień ciepła oddawany otoczeniu:

$$\frac{d(\Delta Q)}{dt} = C_T \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt}$$

Strumień ciepła pobrany przez otoczenie: $\Delta P_T = G_T \Delta T$



Jeśli strumień promieniowania zewnętrznego jest równy zero to z ZZE:

$$\frac{d(\Delta Q)}{dt} + \Delta P_T = 0 \qquad \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{1}{R_T C_T} dt$$

gdzie $R_T = 1/G_T$ i nazywa się opornością cieplną.

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp \frac{-t}{\tau_T}$$

Wymiana ciepła z otoczeniem + oświetlenie

Oznaczmy strumień ciepła P_T' związany z oświetleniem.

Jeśli strumień światła modulowany jest periodycznie w czasie z częstotliwością ω :

$$P_T' = P_{T_0}' \exp(i\omega t)$$

→
$$\frac{d(\Delta Q)}{dt} + \Delta P_T = P_{T_0}' \exp(i\omega t)$$

Niech $\Delta T = a \exp(i\omega t)$, wtedy

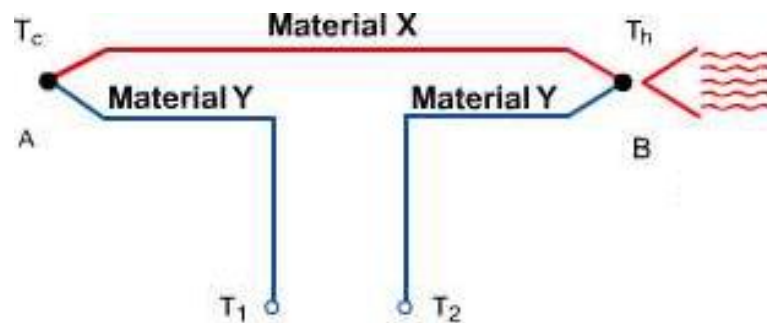
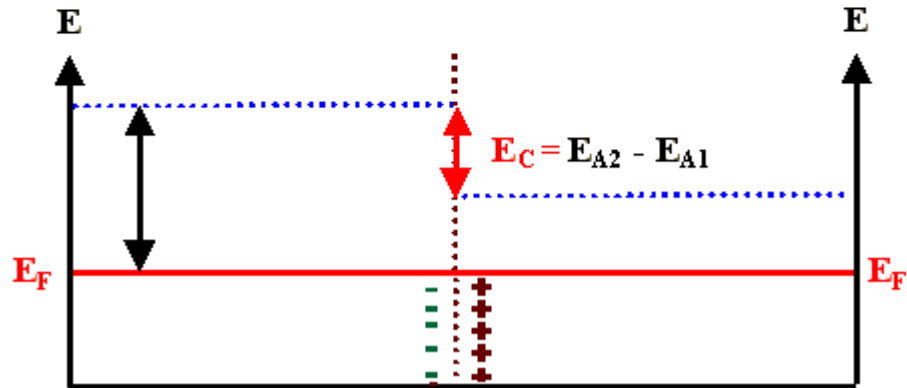
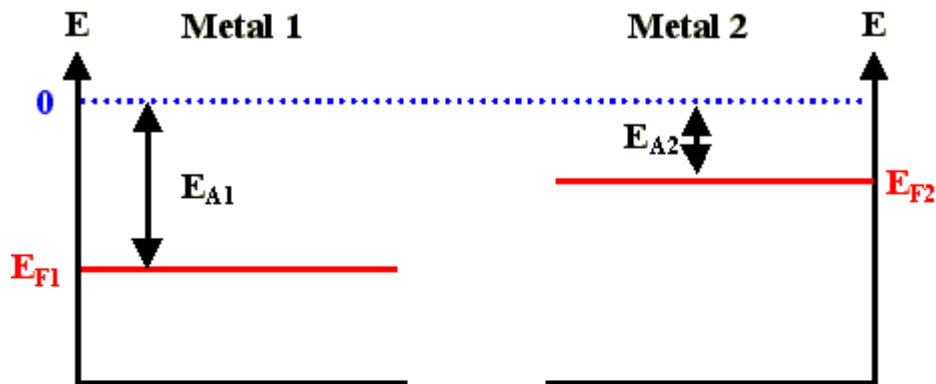
$$a = \frac{P_{T_0}' R_T}{C_T R_T i\omega + 1}$$



$$\Delta T = \frac{P_{T_0}' R_T \exp(i\omega t)}{C_T R_T i\omega + 1}$$

(*)

Kontaktowa różnica potencjałów



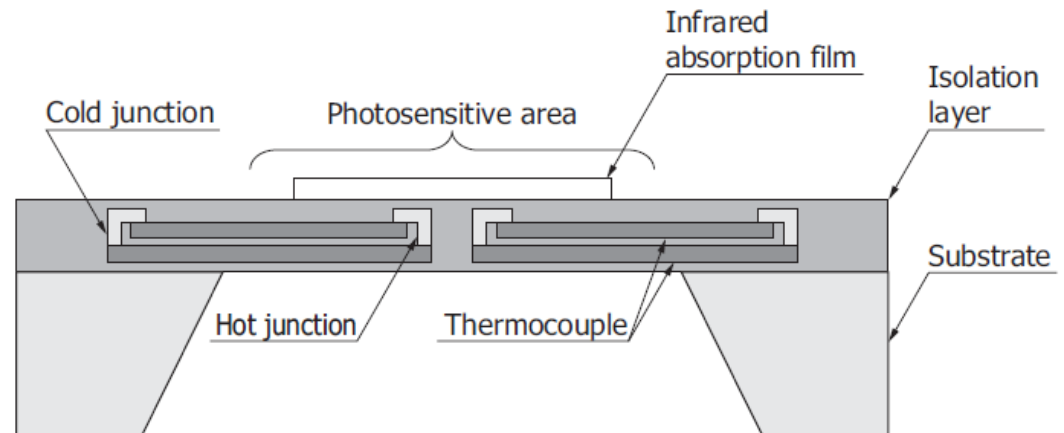
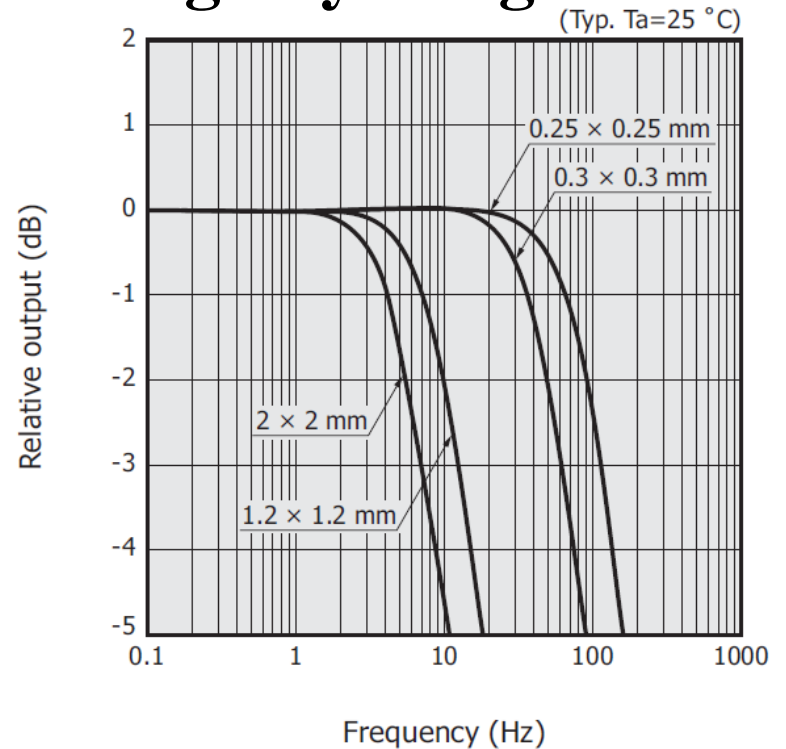
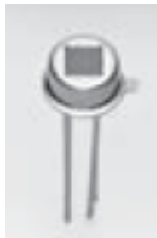
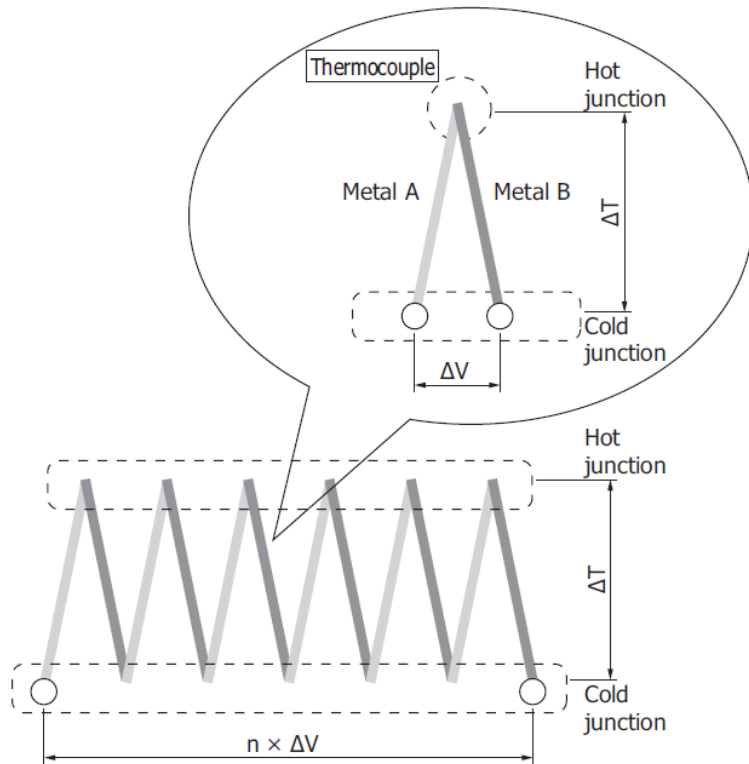
$\mathcal{E}_{termoel}$

$$\mathcal{E}_{termoel} = \alpha \Delta T$$

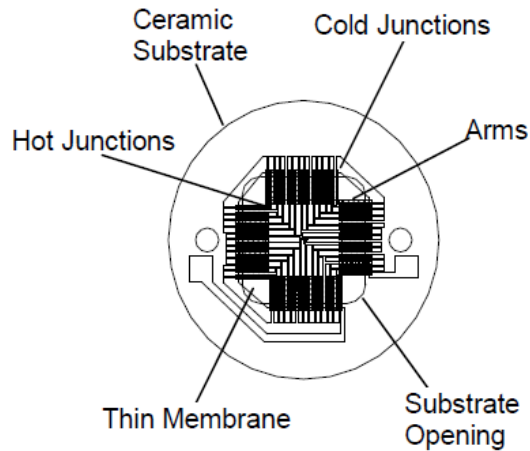
Efekt Seebecka

**Siła termoelektryczna jest proporcjonalna do różnicy temperatur
spojen termopary**

Termopara jako detektor promieniowania elektromagnetycznego



Termopara jako detektor promieniowania elektromagnetycznego



- Termoelement składa się z szeregowo połączonych wielu złączy:**
- płytki odbiornika
 - złącza wykonanego z materiału o dużym współczynniku α ,
 - termicznie izolowanych wsporników mocujących termoelement.

$$\varepsilon_{termoel} = \alpha \Delta T$$

$$\varepsilon_{termoel} = \alpha \frac{P_{T_0} R_T \exp(i\omega t)}{C_T R_T i\omega + 1}$$

Czułość termoelementu:

$$S_T = \frac{|\varepsilon_{termoel}|}{P} = \frac{\varepsilon n \alpha R_T}{|C_T R_T i\omega + 1|} = \frac{\varepsilon n \alpha R_T}{\sqrt{\tau^2 \omega^2 + 1}}$$

ε - wsp. emisyjności
 n – liczba termopar

Detektor piroelektryczny

Kryształy piroelektryczne charakteryzuje asymetria: posiadają biegunową oś symetrii i w związku z tym wykazują polaryzację spontaniczną. Należą do nich m.in. kryształy ferroelektryczne takie jak siarczan trójgliceryny, TGS, SBN ($\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$) oraz PLZT (związek ołowiu z cyrkonem i tytanem domieszkowany lantanem). W stałej temperaturze nie obserwuje się zewnętrznego pola elektrycznego wskutek przyciągania rozproszonych ładunków atmosferycznych i wychwytywania ich na powierzchni aż do zneutralizowania pola polaryzacji. Zmiany temperatury powodują zmiany spontanicznej polaryzacji. To zjawisko, zwane efektem piroelektrycznym jest wykorzystywane do detekcji promieniowania elektromagnetycznego.

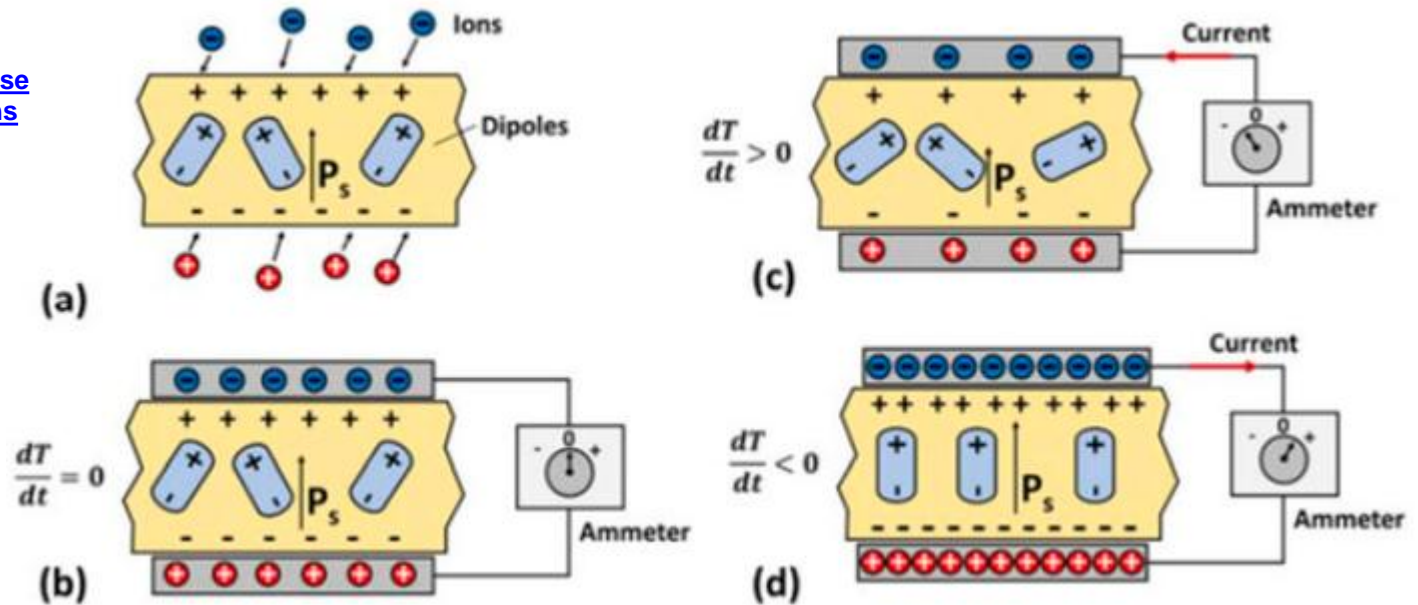
Detektor piroelektryczny

Detektor piroelektryczny to zwykle cienka płytka monokrystaliczna o powierzchni ok. 1mm^2 i grubości $10\text{-}30\mu\text{m}$ oraz osi piroelektrycznej prostopadłej do powierzchni. Na obydwie powierzchnie nałożone są elektrody metalowe w postaci cienkiej warstwy napyłanej w próżni, przy czym elektroda czołowa jest półprzezroczysta.

Promieniowanie ogrzewa kryształ, następuje zmiana polaryzacji spontanicznej i na elektrodach gromadzą się ładunki. Jeśli temperatura kryształu się nie zmienia, po pewnym czasie ładunek ten jest neutralizowany przez ładunki powierzchniowe. Aby na wyjściu detektora piroelektrycznego pojawił się sygnał, konieczna jest zmiana temperatury i dlatego promieniowanie padające na detektor musi być modulowane.

Detektor piroelektryczny

[An overview of pyroelectric photodetector: Photoresponse mechanisms and applications](#)




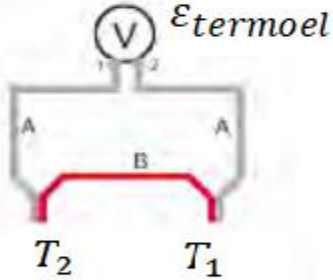

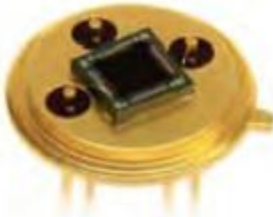
a) Spontaniczna polaryzacja w materiale piroelektrycznym. Jony powietrza neutralizują ładunek powierzchniowy.

a) Ładunki indukowane w metalowych elektrodach pozostają w równowadze z ładunkami w materiale piroelektrycznym gdy $dT/dt = 0$.

c) Gdy temperatura rośnie, polaryzacja spontaniczna słabnie, elektrony odpływają z elektrody górnej do dolnej – płynie prąd o zwrocie przeciwnym do kierunku ruchu elektronów.

d) Gdy temperatura maleje, polaryzacja spontaniczna rośnie, elektrony dopływają do elektrody górnej – płynie prąd o zwrocie przeciwnym do kierunku ruchu elektronów.

Porównanie detektora piroelektrycznego i termopary

detektor	piroelektryczny	termopara
zjawisko	efekt piroelektryczny	efekt Seebecka
sygnał	prąd zwarcia	napięcie rozwarcia
czułość	$\sim \Delta T_s / dt$	$\sim \Delta T_s$
zasada działania	$\frac{dT}{dt} > 0$ 	
przykład	 <p>LME-302</p>	 <p>ST150</p>

Bolometr

Pod wpływem ciepła wydzielonego w bolometrze przy absorpcji promieniowania wzrasta temperatura bolometru i zmienia się jego opór elektryczny. Ponieważ zmiany oporu mogą być b. małe, stosuje się układy mostkowe do pomiaru tych zmian, np. mostek Wheatstone'a.

Rezystancja w funkcji temperatury

$$R = R_0 [1 + \alpha_R (T - T_0)]$$

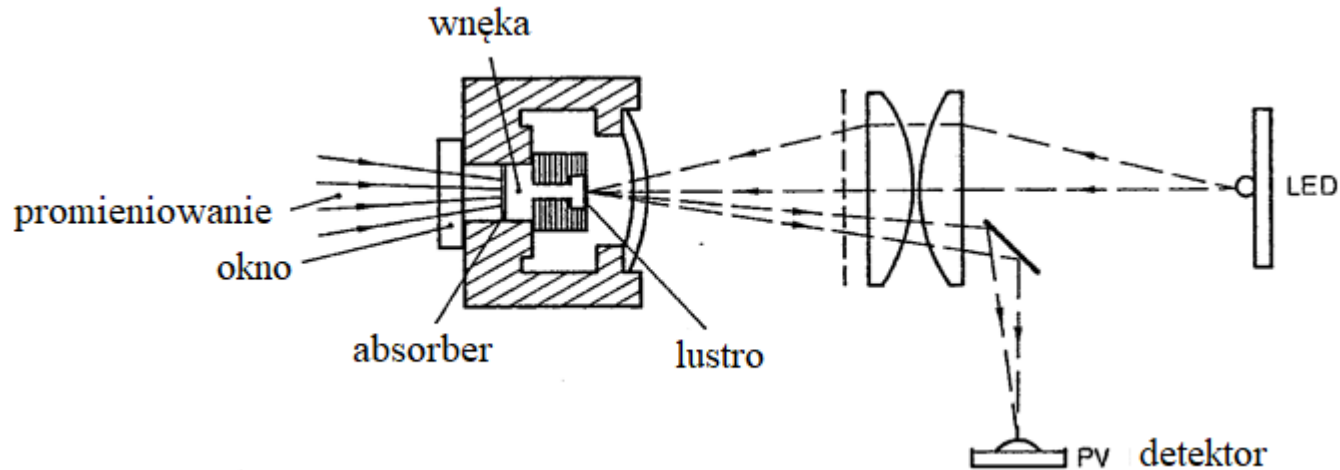
temperaturowy współczynnik rezystancji

$$\alpha_R = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT},$$

R_0 jest rezystancją w temperaturze T_0

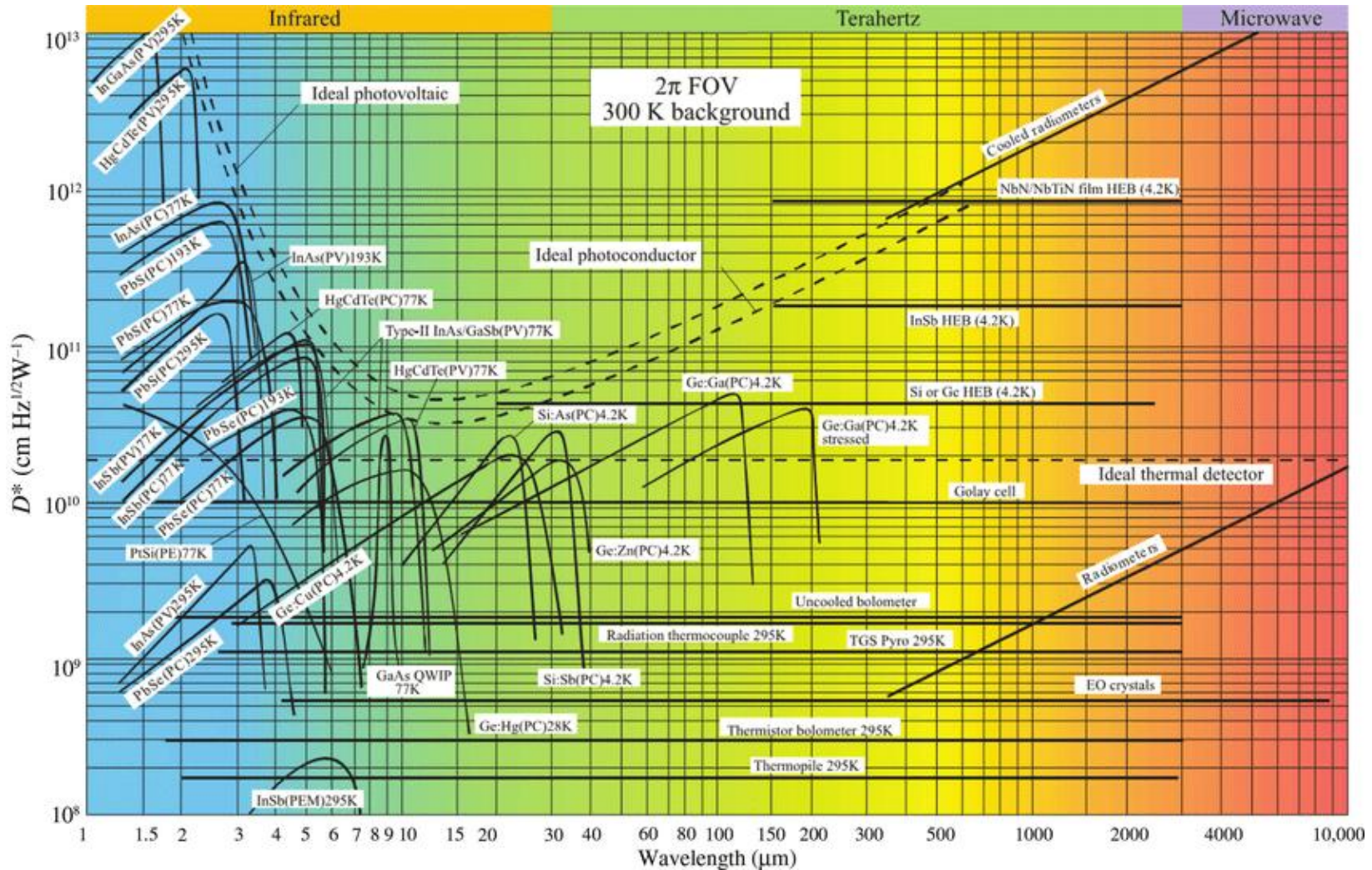
Najczęściej używane: platyna, nikiel, półprzewodniki

Komórka Golay'a



Komórka Golay'a jest zbudowana z metalowego cylindra, wewnątrz którego znajduje się wnęka która z jednej strony jest ograniczona przez poczernioną płytkę (absorber) a z drugiej przez elastyczną membranę która jest na części zewnętrznej posrebrzana (lustro). We wnęce znajduje się gaz – ksenon. Cylinder jest zamknięty z jednej strony przez okno, przez które światło oświetla absorber, z drugiej strony przez soczewkę. Pod wpływem światła absorber się ogrzewa, gaz się rozpręża rozciągając membranę. Lustro membrany odbija światło pochodzące od oświetlacza LED. Światło pada na detektor fotowoltaiczny. Na wyjściu detektora sygnał zależny jest od położenia membrany, zatem zależy od intensywności promieniowania.

Detekcyjności - porównanie



$$R_v(\lambda, f) = \frac{V_s}{\Phi_e(\lambda)}$$

$$NEP = \frac{V_n}{R_v} = \frac{I_n}{R_i}$$

$$D^* = \frac{D(A_d \Delta f)^{1/2}}{V_n} R_v$$