



WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI

LABORATORIUM DETEKCJI SYGNAŁÓW OPTYCZNYCH

GRUPA:	PROTOKÓŁ DO ĆWICZENIA nr	
Skład podgrupy nr	Temat ćwiczenia: Badanie termopary - część II. Wyznaczenie czułości widmowej.	
	Data wykonania ćwiczenia	Prowadzący ćwiczenie
	Ocena	Podpis prowadzącego ćw.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		

Tab. 1. Dane urządzeń pomiarowych

Lp.	Nazwa urządzenia	Marka	Typ
1
2
3
4
5
6
7

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z podstawowymi parametrami i właściwościami termopary, metodami pomiarowymi stosowanymi przy pomiarze głównych parametrów tego rodzaju fotodetektorów oraz praktyczna realizacja tych pomiarów zgodnie z procedurami przedstawionymi w niniejszej instrukcji. Na podstawie przeprowadzonych symulacji oraz pomiarów w części I należy wyznaczyć charakterystykę widmowej czułości napięciowej termopary.

2. Opis metod i układów pomiarowych

Aby wyznaczyć charakterystykę widmowej czułości napięciowej termopary należy:

1. na podstawie pomiarów temperaturowych przeprowadzonych w części I obliczyć egzytancję energetyczną źródła promieniowania IR-12K w zakresie fal o długościach określonych filtrem optycznym termopary TERM-D lub TERM-E;
2. określić charakterystykę zmian egzytancji energetycznej źródła w zależności od mocy zasilania źródła oraz od długości fali;
3. znając egzytancję energetyczną źródła promieniowania obliczyć moc promieniowania padającego na powierzchnię fotoczułą termopary;
4. wykreślić wykres zależności napięcia na wyjściu termopary od mocy promieniowania a następnie metodą regresji liniowej wyznaczyć czułość napięciową termopary;
5. wyznaczyć charakterystykę czułości widmowej termopary (TERM-D lub TERM-E).

W celu realizacji powyższych zadań należy posłużyć się wynikami pomiarów z części I ćwiczenia laboratoryjnego pt. „Badanie termopary” oraz dodatkowo należy przeprowadzić symulacje w specjalistycznym oprogramowaniu MBRC (*Mikron Blackbody Radiation Computer*, rys. 1).

Podczas pomiarów jako źródło promieniowania stosowano emiter ciepły z drutu oporowego, typu IR-12K, którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry źródła promieniowania typu IR-12K

Napięcie	max. 7.0 V
Temperatura	max. 975°C
Natężenie prądu	max. 1.9 A
Moc	11 W
Emisyjność (ϵ)	0,7



Rys. 1. Fotografia stanowiska laboratoryjnego

Elementami badanymi byly termopary: typu TERM-D lub TERM-E. Glowne ich parametry przedstawiono w tabeli 2.

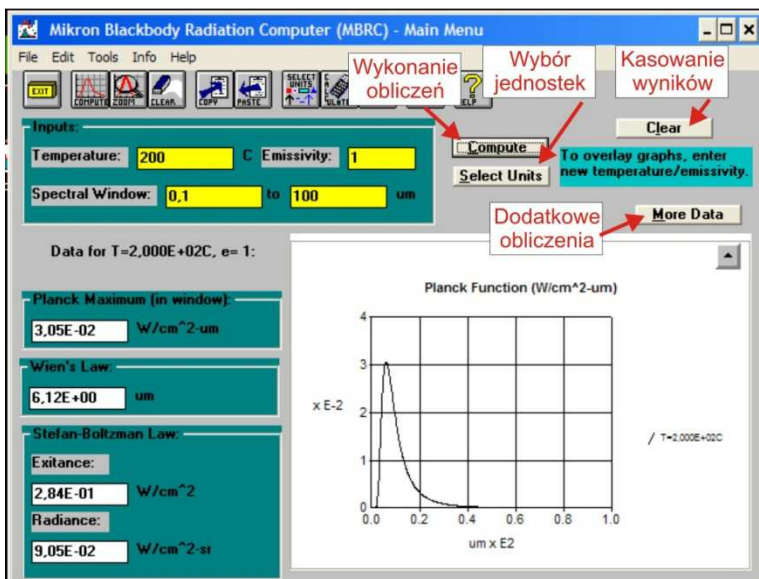
Tab. 2. Parametry badanych termopar

Parametr	TERM-D	TERM-E
Napięcie zasilania [V]/Natężenie prądu [mA]	4,5 – 5,5/1 - 2,2	
Gotowość do pracy [s]	0,5	
Powierzchnia fotoczuła [mm ²]	0,36	
Szybkość odpowiedzi detektora [ms]	5	
Zakres pomiaru temperatury [°C]	0 - 200	
Czułość temperaturowa S_T [mV/°C]	15	
Pasma filtru optycznego [μm]	od 6,5	od 5,5
Stała materiałowa K	$6,85 \times 10^{-9}$	$1,04 \times 10^{-9}$
Stała eksponentyjna n	3,3	3,6
Napięcie referencyjne U_{25} dla temperatury 25°C [V]	1,225	1,225

Program MBRC umożliwia obliczanie parametrów ciała doskonale czarnego na podstawie prawa Plancka, Stefana Boltzmana oraz Wiena (rys. 2). Danymi wejściowymi są: temperatura (domyślnie w *Kelwinach*), emisyjność źródła (ϵ) oraz zakres spektralny, który określa jedynie zakres długości fal funkcji Plancka widocznej na ekranie. Aby wykonać obliczenia w ograniczonym paśmie należy przejść do dodatkowych obliczeń poprzez naciśnięcie przycisku „MORE DATA”.

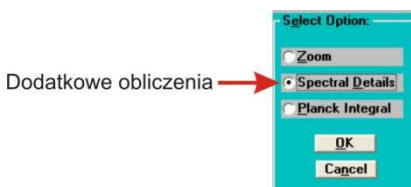
Aby zmienić domyślnie ustawione jednostki należy nacisnąć „SELECT UNITS”. Zaleca się jedynie zmianę jednostki temperatury na °C.

Po wprowadzeniu niezbędnych danych należy nacisnąć „COMPUTE” w celu wykonania obliczeń. Po wykreśleniu 5 funkcji Plancka, program prosi o skasowanie dotychczasowych danych, aby możliwe były dalsze obliczenia. Dokonuje się tego poprzez naciśnięcie przycisku „CLEAR”.



Rys. 2. Widok okna głównego programu MBRC

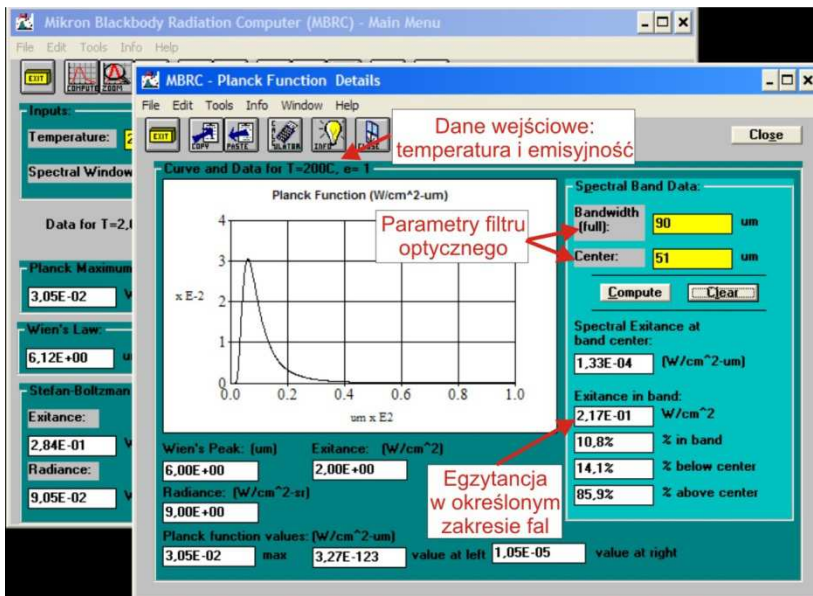
W celu wykonania obliczeń egzytancji w określonym zakresie długości fal należy nacisnąć „MORE DATA”. Wówczas pojawi się okno wyboru jak na rys. 3. Należy wybrać opcję „SPECTRAL DETAILS”.



Rys. 3. Widok okna wyboru dodatkowych obliczeń programu MBRC

Następnie pojawi się kolejne okno programu, które przedstawiono na rys. 4. Dane takie jak temperatura oraz emisyjność badanego obiektu (źródła promieniowania) pobierane są automatycznie z poprzedniego okna. Podczas obliczeń należy jednak zwracać uwagę, czy dane te są poprawne. Ich wartości widoczne są w górnej części tego okna. Aby wykonać obliczenia trzeba podać parametry filtra optycznego, określone przez szerokość pasma oraz środkową długość fali. W ten sposób ogranicza się długości fal do zakresu pracy badanych termopar. Po naciśnięciu przycisku „COMPUTE”

program wykonuje obliczenia, a poszukiwany wynik (egzytancja w określonym zakresie) wyświetlany jest w miejscu zaznaczonym na rys. 4.



Rys. 4. Widok okna programu MBRC służącego do dodatkowych obliczeń

3. Przebieg ćwiczenia

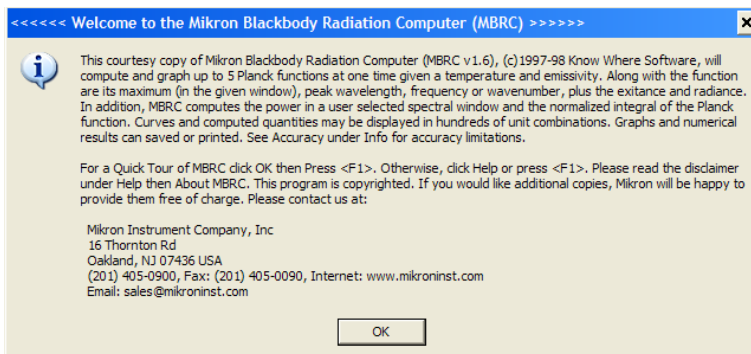
3.1. Symulacje w programie MBRC

Danymi niezbędnymi do przeprowadzenia symulacji w programie MBRC są:

- emisyjność źródła,
- jego temperatura,
- zakres długości fal, któremu odpowiada pasmo filtra optycznego badanej termopary.

Emisyjność (ϵ) oraz zakres długości fal można odczytać z danych technicznych źródła IR-12K i badanej termopary (TERM-D lub TERM-E). Temperatury źródła T_{zr} dla różnych mocy zasilania zostały wyznaczone w części I ćwiczenia.

W pierwszej kolejności należy uruchomić komputer i zalogować się jako „GOŚĆ”. Na pulpicie znajduje się ikona programu MBRC. Po dwukrotnym kliknięciu pojawi się komunikat jak na poniższym rysunku. Należy kliknąć „OK.” i program się uruchomi.



Po pojawieniu się okna programu jak na rys. 2 w odpowiednie pola należy wpisać dane wejściowe (*Inputs*), przy czym jako okno spektralne (*Spectral Window*) należy przyjąć zakres od 0,1 do 100 μm . Po wyznaczeniu funkcji Plancka (kliknięcie na „COMPUTE”) należy przejść do okna dodatkowych obliczeń (rys. 4).

W oknie tym należy podać parametry filtra optycznego badanej termopary. Jeśli prowadzący ćwiczenie nie wskaże inaczej, należy przyjąć dolną granicę pasma optycznego z danych technicznych termopary (tab. 2), natomiast górną:

a) wariant I:

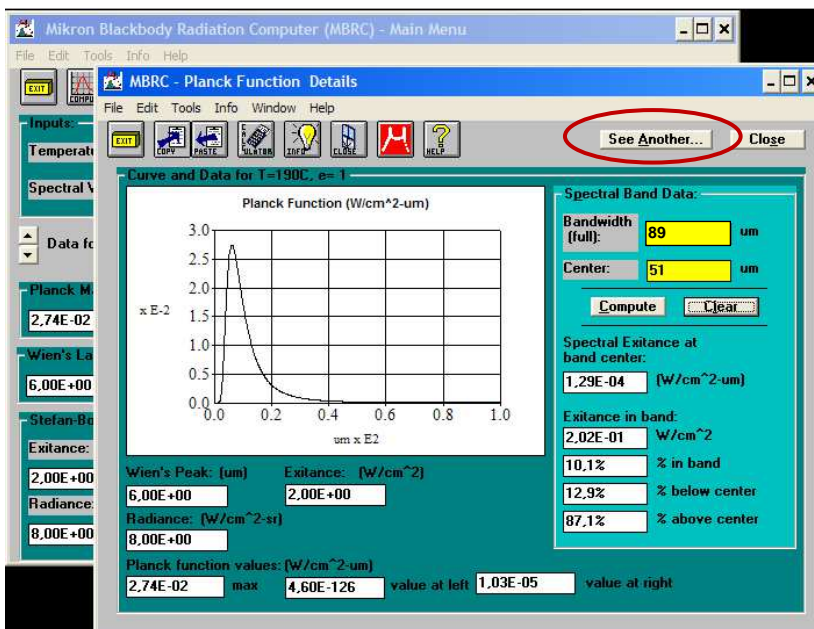
- 95,5 μm dla termopary TERM-D;
- 94,5 μm dla termopary TERM-E;

b) wariant II:

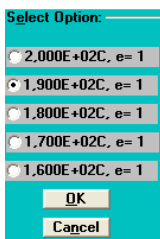
- 21,5 μm dla termopary TERM-D;
- 20,5 μm dla termopary TERM-E.

W czasie tych obliczeń należy pamiętać, że w programie podaje się szerokość pasma i jego środkową długość fali oraz o sprawdzaniu poprawności danych wejściowych z poprzedniego okna, które są wyświetlane nad wykresem funkcji Plancka (rys. 4).

Aby zmienić wartość temperatury na kolejną nie ma potrzeby zamykania okna dodatkowych obliczeń. Wystarczy wpisać żądaną wartość temperatury (w $^{\circ}\text{C}$) w oknie podstawowym, nacisnąć „COMPUTE” i przejść z powrotem do okna obliczeń dodatkowych. W oknie tym należy kliknąć przycisk „SEE ANOTHER”.



Wówczas pojawi się okno wyboru danych wejściowych (poniższy rysunek) i należy wybrać aktualne i nacisnąć „OK”.



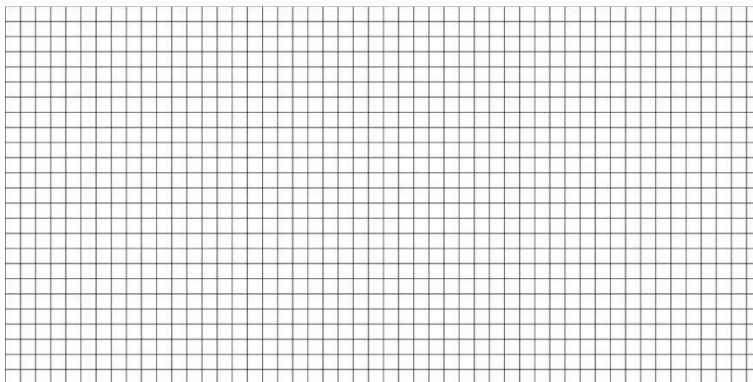
Poszukiwany wynik, egzytancja energetyczna źródła w zadanym paśmie długości fal M_{el} (dla drugiego wariantu M_{el1}), wyświetlany jest w polu „EXITANCE IN BAND”. Wyniki przeprowadzonych symulacji zapisać w tabeli 5.

Tab. 5. Wyniki symulacji

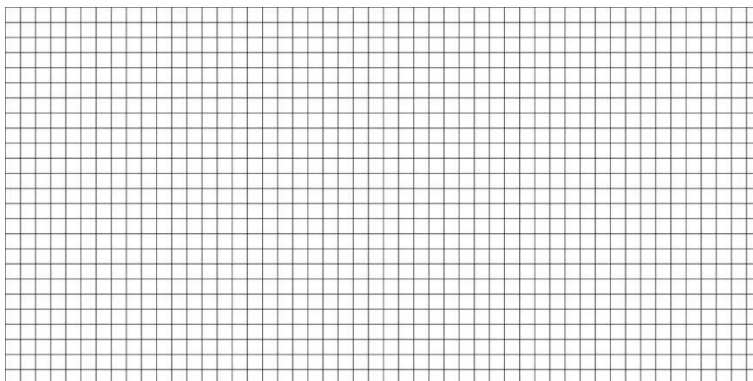
Lp.	U_T [mV]	U_R [mV]	T_R [C]	$T_{\dot{z}r}$ [C]	Długość fali [μm]	M_{el} [W/cm ²]	M_{ell} [W/cm ²]
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
30							

4. Opracowanie wyników

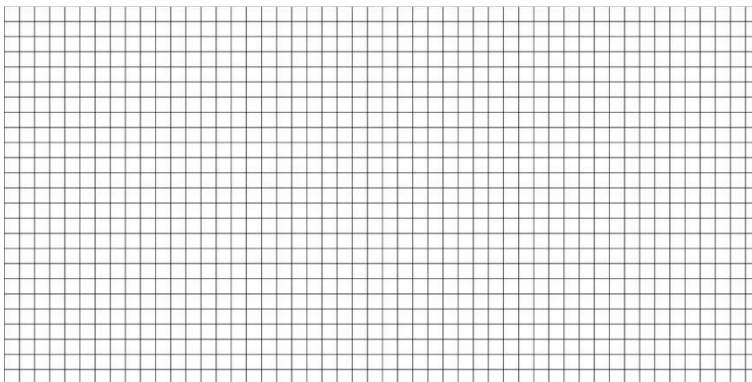
Zadanie 1, 2. Obliczenia egzytancji energetycznej źródła promieniowania IR-12K w zakresie fal o długościach określonych filtrem optycznym termopary TERM-D lub TERM-E na podstawie pomiarów temperaturowych (z części I); Określenie charakterystyki zmian egzytancji energetycznej źródła w zależności od mocy zasilania źródła oraz od długości fali.



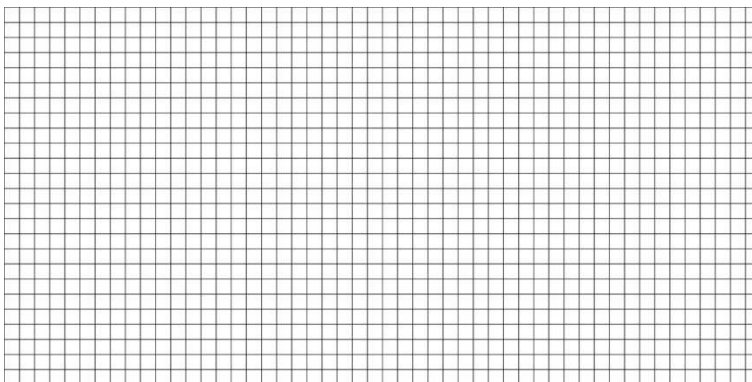
Rys. 4.1. Zależność egzytancji energetycznej źródła promieniowania IR-12K od mocy zasilania w zakresie długości fal określonych filtrem optycznym TERM-E



Rys. 4.2. Zależność egzytancji energetycznej źródła promieniowania IR-12K od mocy zasilania w zakresie długości fal określonych filtrem optycznym TERM-D

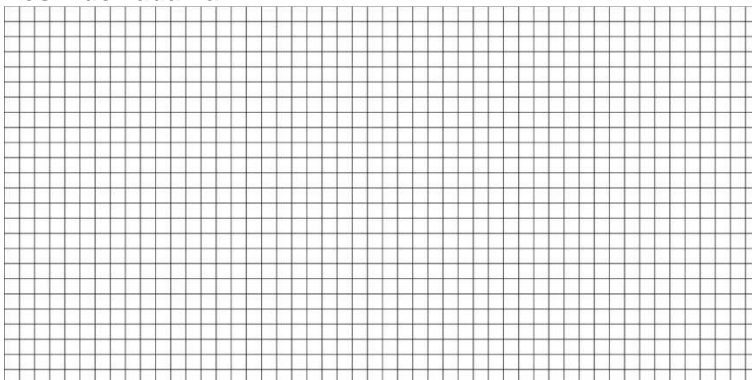


Rys. 4.3. Zależność egzytancji energetycznej źródła promieniowania IR-12K od długości fali w zakresie długości fal określonych filtrem optycznym TERM-E

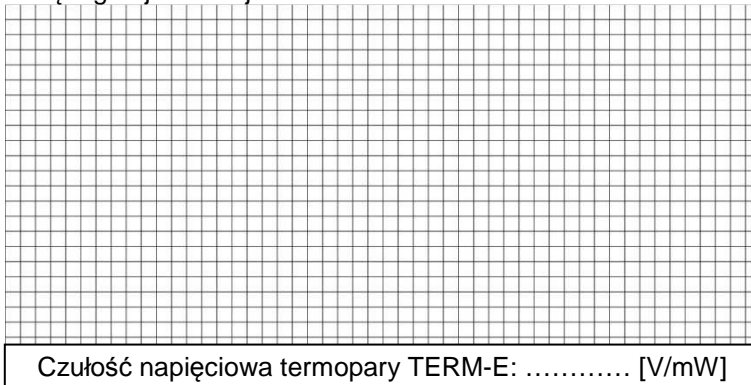


Rys. 4.4. Zależność egzytancji energetycznej źródła promieniowania IR-12K od długości fali w zakresie długości fal określonych filtrem optycznym TERM-D

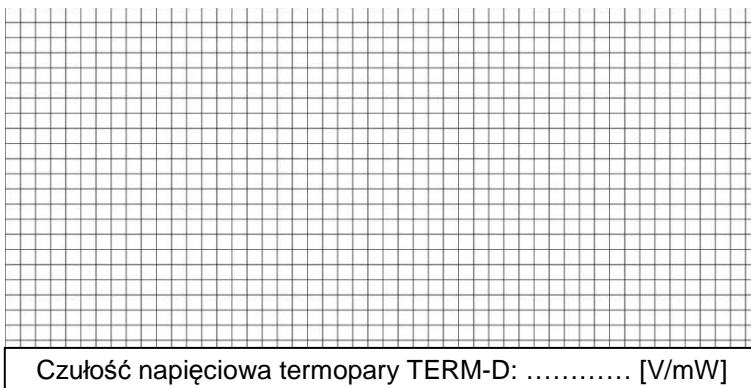
Wnioski do zadania 1 i 2



Zadanie 3, 4. Obliczenie mocy promieniowania padającego na powierzchnię fotoczułą termopary na podstawie wyznaczonej egzytancji energetycznej źródła promieniowania. Wykreślenie wykresu zależności napięcia na wyjściu termopary od mocy promieniowania oraz wyznaczenie czułości napięciowej termopary metodą regresji liniowej.

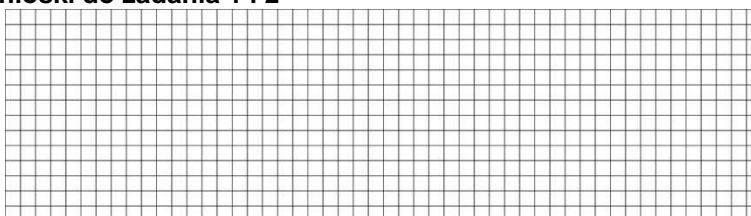


Rys. 4.5. Zależność napięcia na wyjściu termopary TERM-E od mocy promieniowania padającego na powierzchnię fotodetektora

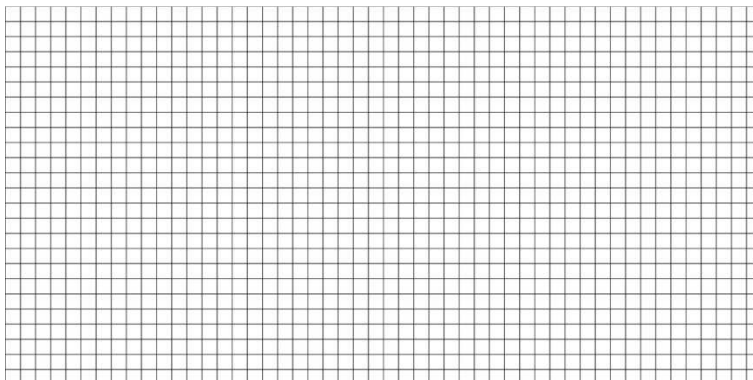


Rys. 4.6. Zależność napięcia na wyjściu termopary TERM-D od mocy promieniowania padającego na powierzchnię fotodetektora

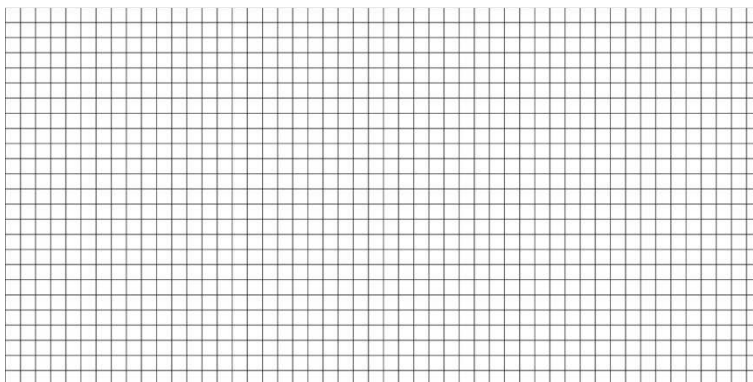
Wnioski do zadania 1 i 2



Zadanie 5. Wyznaczenie charakterystyki czułości widmowej termopary (TERM-D lub TERM-E).

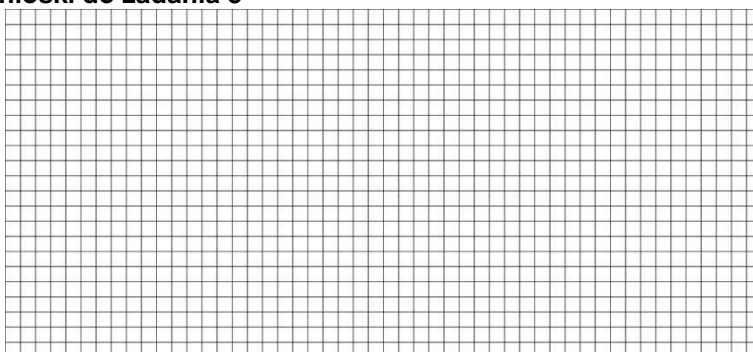


Rys. 4.7. Charakterystyka widmowej czułości napięciowej termopary TERM-E.

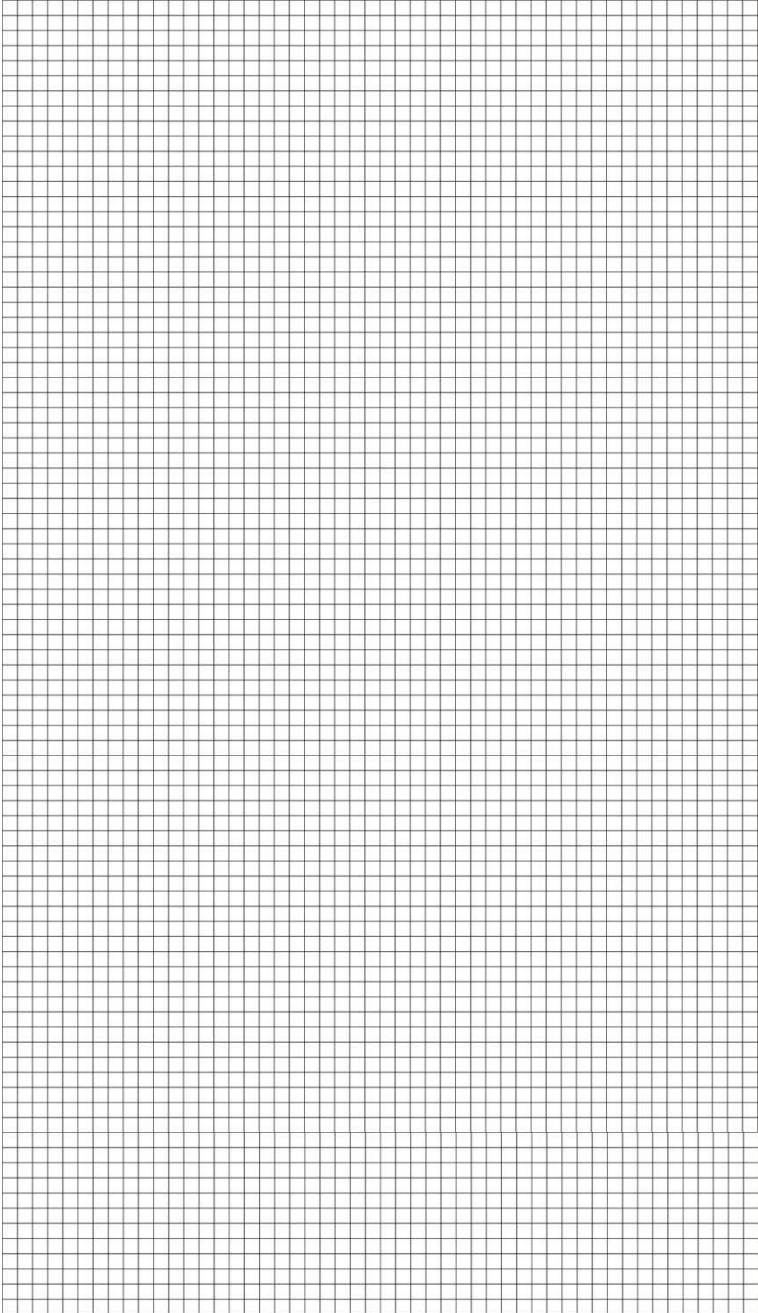


Rys. 4.8. Charakterystyka widmowej czułości napięciowej termopary TERM-D.

Wnioski do zadania 5



Podsumowanie



5. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

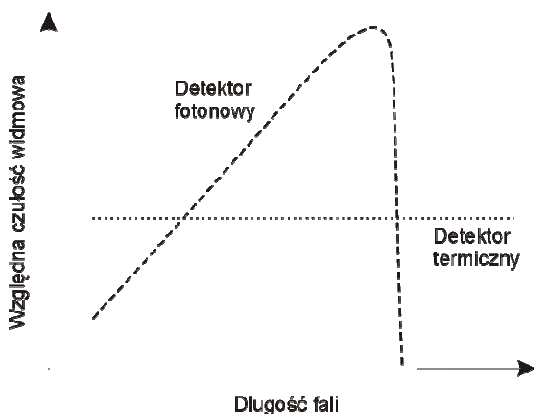
5.1. Wprowadzenie

Detektory promieniowania elektromagnetycznego możemy podzielić na dwie podstawowe grupy:

- detektory termiczne (np. bolometry, termopary, detektory piroelektryczne)
- oraz detektory fotonowe (samoistne, domieszkowe, na swobodnych nośnikach, na studniach kwantowych) [1].

W detektorach termicznych padające promieniowanie jest absorbowane w materiale, co powoduje podniesienie temperatury elementu fotoczułego. Poziom sygnału na wyjściu takiego detektora, wywołany zmianą pewnej właściwości materiału zależnej od temperatury, zależy od mocy padającego promieniowania (lub szybkości jego zmian), lecz nie zależy od jego widmowego składu (rys. 1). W większości przypadków cechują się stosunkowo niską czułością oraz małą szybkością odpowiedzi (procesy grzania i chłodzenia charakteryzują się dużą bezwładnością) [1].

W przypadku detektorów fotonowych sygnał wyjściowy jest wywołany zmianą rozkładu energii nośników wskutek padającego promieniowania absorbowanego w wyniku oddziaływania fotonów z elektronami. Detektory fotonowe charakteryzują się selektywną zależnością czułości od długości fali padającego promieniowania (rys. 5.1), wyższą czułością i większą szybkością odpowiedzi.



Rys. 5.1. Charakterystyki względnej czułości widmowej detektora termicznego oraz fotonowego

5.2. Zasada działania detektorów termicznych

Idea pracy detektora termicznego polega na tym, że padające promieniowanie podnosi temperaturę detektora, a następnie zmianę pewnej właściwości zależnej od temperatury takiej jak: siły termoelektrycznej, rezystancji, czy też pojemności elektrycznej. Detektor termiczny można scharakteryzować pojemnością cieplną C_{th} sprzężoną z przewodnością cieplną G_{th} zależną od sposobu połączenia detektora z otoczeniem. Gdy promieniowanie nie pada na detektor, średnia temperatura detektora wynosić będzie T . Kiedy promieniowanie jest absorbowane przez detektor, przyrost temperatury określimy rozwiązując równanie bilansu ciepła [1]

$$\Delta T = \frac{\varepsilon \Phi_o}{(G_{th}^2 + \omega^2 C_{th}^2)^{1/2}} \quad , \quad (5.1)$$

gdzie: ε – emisyjność detektora, Φ_o – amplituda strumienia promieniowania o częstotliwości kątovej ω , który pada na detektor o powierzchni A .

Równanie (5.1) wskazuje na istotne cechy detektora termicznego. Ażeby uzyskać możliwie dużą wartość ΔT , pojemność cieplna detektora (C_{th}) i termiczne sprzężenie z otoczeniem (G_{th}) winne być możliwie jak najmniejsze. Należy tak konstruować detektor aby jak najbardziej odizolować detektor od otoczenie (wyeliminować wszelkie dodatkowe łącza termiczne detektora z otoczeniem) i zmniejszyć masę detektora

Z równania (5.1) wynika, że ze wzrostu ω może dojść do sytuacji, że wyrażenie $\omega^2 C_{th}^2$ przewyższy G_{th}^2 i wówczas ΔT będzie zależne odwrotnie proporcjonalnie od ω . Z tego też powodu wprowadzono charakterystyczną termiczną stałą czasową definiowaną jako

$$\tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}} = C_{th} R_{th} \quad , \quad (5.2)$$

gdzie $R_{th} = 1/G_{th}$ jest rezystancja termiczną. Wówczas równanie (1) przyjmuje postać

$$\Delta T = \frac{\varepsilon \Phi_o R_{th}}{(1 + \omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}} \quad . \quad (5.3)$$

Typowa wartość termicznej stałej czasowej wynosi kilka milisekund. Jest więc znacznie większa niż typowa wartość stałej czasowej detektora fotonowego. Zauważmy, że dla detektora termicznego konieczny jest optymalny kompromis pomiędzy czułością detektora określoną ΔT i stałą czasową. Jeżeli dążymy do

uzyskania wyższej czułości detektora, jego szybkość odpowiedzi będzie mniejsza.

Czułość napięciowa detektora, określana stosunkiem wyjściowego sygnału napięciowego detektora do padającej mocy promieniowania, jest równa

$$R_v = \frac{K \varepsilon R_{th}}{(1 + \omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}}, \quad (5.4)$$

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

W zakresie niskich częstotliwości modulacji promieniowania ($\omega \ll 1/\tau_{th}$), czułość napięciowa jest proporcjonalna do rezystancji cieplnej i nie zależy od pojemności cieplnej. Odwrotną sytuację mamy w zakresie wysokich częstotliwości ($\omega \gg 1/\tau_{th}$). Wówczas R_v nie zależy od R_{th} i jest odwrotnie proporcjonalne do pojemności cieplnej.

W idealnych warunkach (całkowita izolacja z otoczenia) detektor termiczny osiąga graniczne parametry. Wartość graniczną można obliczyć z prawa Stefana-Boltzmana. Jeżeli temperatura detektora wzrasta o małą wartość dT , strumień promieniowania wzrasta o $4A\varepsilon\sigma T^3 \delta T$. Wówczas składowa radiacyjna przewodnictwa cieplnego wynosi

$$G_R = \frac{1}{(R_{th})_R} = \frac{d}{dT} (A\varepsilon\sigma T^4) = 4A\varepsilon\sigma T^3 \quad (5.5)$$

W tym przypadku

$$R_v = \frac{K}{4\sigma T^3 A (1 + \omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2}} \quad (5.6)$$

Jeżeli detektor jest w równowadze termodynamicznej z otoczeniem, fluktuacja mocy promieniowania płynącego do detektora wynosi

$$\Delta P_{th} = (4kT^2 G)^{1/2} \quad (5.7)$$

i jest najmniejsza gdy G przyjmuje minimalną wartość, tzn. G_R . Wówczas ΔP_{th} określa minimalną wartość mocy wykrywanej przez idealny detektor termiczny.

Najważniejszymi detektorami termicznymi są termopary, bolometry i detektory piroelektryczne, które zostaną omówione w następujących podpunktach niniejszej instrukcji.

5.3. Termopary

Termopara zbudowana jest z dwóch różnych materiałów A i B połączonych przewodem C. Złącze pomiarowe połączone jest z elementem fotoczułym, na który pada promieniowanie. Pod wpływem zaabsorbowanego promieniowania wzrasta temperatura powierzchni aktywnej z T do $T + \Delta T$, powodując nagrzanie złącza [1]. Różnica temperatur złącz powoduje powstanie siły elektromotorycznej, której wartość jest wprost proporcjonalnej do różnicy temperatur tych złączy

$$\Delta V = \alpha_s \Delta T \quad (5.8)$$

gdzie α_s jest współczynnikiem Seebecka zwykle wyrażonym w jednostkach $\mu V/K$. Biorąc pod uwagę równanie (4) $K = \alpha$.

W zakresie małych częstotliwości, $\omega^2 \tau_{th}^2 \ll 1$, i wówczas

$$R_v = \frac{\alpha \mathcal{E}}{G_{th}}. \quad (5.9)$$

Należy zaznaczyć, że efekt Peltiera może spowodować znaczą niesymetrię w efekcie termoelektrycznym. Efekt ten jest odwracalny skoro absorpcja i uwalnianie ciepła zależą od kierunku przepływu prądu. Pomiedzy współczynnikiem Peltiera (określającym stosunek absorbowanego ciepła do prądu elektrycznego) a współczynnikiem Seebecka istnieje ścisła zależność

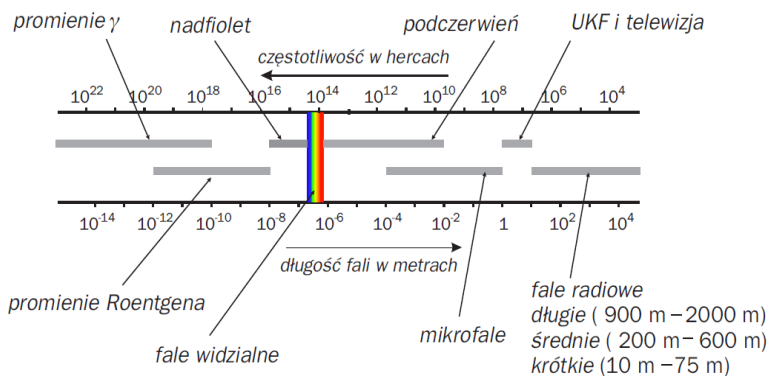
$$\Pi = \alpha_s T \quad (5.10)$$

Zwykle wartość współczynnika Peltiera wynosi 100–300 mV.

Jeżeli N termopar zostanie połączonych szeregowo wówczas czułość rośnie N -krotnie.

5.4. Podstawy radiometrii

Promieniowanie optyczne dzieli się na trzy podzakresy: promieniowanie nadfioletowe, promieniowanie widzialne i promieniowanie podczerwone. W zależności od długości fali inaczej oddziałuje na przedmioty jak i organizmy żywe. Na poniższym rysunku przedstawiony jest diagram poszczególnych podzakresów promieniowania elektromagnetycznego.



Rys. 5.3. Podzakresy fal elektromagnetycznych

Promieniowanie podczerwone (termiczne) to promieniowanie, które emituje ciało mające temperaturę większą od zera bezwzględnego. Promieniowanie to jest falą elektromagnetyczną o określonym widmie. Emitowane jest przez wszystkie organizmy żywe.

Ciało doskonale czarne jest to ciało pochłaniające całkowicie padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, kąta i długości fal padającego promieniowania. Współczynnik pochłaniania dla takiego ciała jest równy jedności dla dowolnej długości fali. Maksymalną ilość energii emitowanej przez ciało o temperaturze T w jednostce czasu w przedziale długości fal $d\lambda$ wyraża prawo Plancka

$$M_{e\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi}{\lambda^5} \frac{hc^2}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}, \quad (5.13)$$

gdzie: h – stała Plancka, k – stała Boltzmanna, c – prędkość światła.

Całka wyrażenia opisującego prawo Plancka umożliwia obliczenie całkowitej energii emitowanej w jednostce czasu z jednostkowej powierzchni ciała doskonale czarnego, tzw. egzytancji energetycznej. Zależność ta nazywana jest prawem Stefana Boltzmanna

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4, \quad (5.14)$$

gdzie: σ – jest stałą Stefana Boltzmanna równą

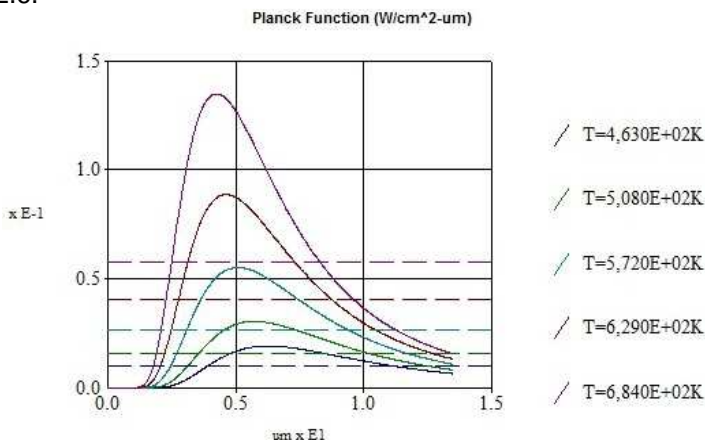
$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5,67 \times 10^{-12} \frac{W}{cm^2 K^4}. \quad (5.15)$$

Z rozkładu Plancka promieniowania ciała doskonale czarnego wynika również prawo Wiena

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T[K]} [\mu\text{m}] \quad (5.16)$$

gdzie: λ_{\max} – długość fali o maksymalnej egzytancji, T – temperatura ciała doskonale czarnego [K].

Prawo Wiena opisuje promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez ciało doskonale czarne. Wraz ze wzrostem temperatury widmo promieniowania ciała doskonale czarnego przesuwa się w stronę fal krótszych, co przedstawione jest na rys. 2.6.



Rys. 5.4. Rozkład widma promieniowa termicznego dla różnych temperatur (wyniki symulacji w programie MBRC)

6. Literatura.

1. Z. Bielecki, A. Rogalski „Detekcja sygnałów optycznych”, WNT 2001.