

LABORATORIUM OPTOELEKTRONIKI

Ćwiczenie 10

Badanie detektorów promieniowania optycznego

Cel ćwiczenia:

Zapoznanie studentów z podstawowymi charakterystykami detektorów promieniowania optycznego.

Badane elementy:

Fotorezystor oraz fotodioda.

Zakres ćwiczenia:

Pomiar charakterystyk prądowo- napięciowych, oraz detekcyjności widmowej wymienionych wyżej detektorów.

1. Wstęp teoretyczny

Fotodetektory

Promieniowanie elektromagnetyczne padające na jakąś substancję może zostać odbite, zaabsorbowane lub też może przejść przez tę substancję z pewnym niewielkim tylko osłabieniem jego natężenia. Detektory promieniowania elektromagnetycznego konstruuje się w taki sposób, by maksymalna część padającego na nie promieniowania została w nich zaabsorbowana.

Promieniowanie optyczne jest częścią bardzo szerokiego widma promieniowania elektromagnetycznego obejmującego zakres fal o długości od 10 nm do kilku um. Zakres ten jest dzielony na trzy podzakresy:

- promieniowanie ultrafioletowe ($\lambda < 380 \text{ nm}$)
- promieniowanie widzialne ($\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$)
- promieniowanie podczerwone ($\lambda > 780 \text{ nm}$)

Promieniowanie optyczne jest natury korpuskularno falowej czyli można je traktować jako rozchodzącą się falę o częstotliwości ν albo jako strumień fotonów, z których każdy niesie energię:

$$W_f = h\nu$$

gdzie h jest stałą Plancka. Ponieważ między długością a częstotliwością fali istnieje związek

$$\lambda = c/\nu$$

w którym c jest prędkością światła. Długość fali odpowiadającej energii fotonu określa zależność:

$$\lambda_f = hc/ W_f$$

Zjawiska elektryczne zachodzące pod wpływem promieniowania nazywa się ogólnie zjawiskami fotoelektrycznymi. Mogą one mieć charakter zewnętrzny lub wewnętrzny. Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne powstaje wówczas, gdy energia fotonów jest na tyle duża, że pobudzone optycznie elektrony opuszczają powierzchnię ciała, a więc następuje fotoemisja. Jeżeli energia fotonów jest mniejsza, tak że nie jest możliwa fotoemisja, a jedynie zmiana stanu energetycznego elektronów ciała, to zjawisko fotoelektryczne określa się jako wewnętrzne. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne może przejawiać się wzrostem przewodnictwa elektrycznego półprzewodnika lub dielektryka - nazywa się je wówczas zjawiskiem fotoprzewodnictwa, lub powstaniem siły elektromotorycznej w półprzewodniku o wyraźnie ukształtowanym złączu p-n nazywa się je wówczas zjawiskiem fotowoltaicznym.

Fotodetektory wykorzystujące zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (fotokomórki i fotopowielacze) są obecnie w zasadzie stosowane w specjalistycznej aparaturze np. do precyzyjnych pomiarów fotometrycznych. Powszechnie stosowane obecnie fotodetektory wykorzystują zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Są to fotorezystory, fotodiody, fototranzystory i fototyristory.

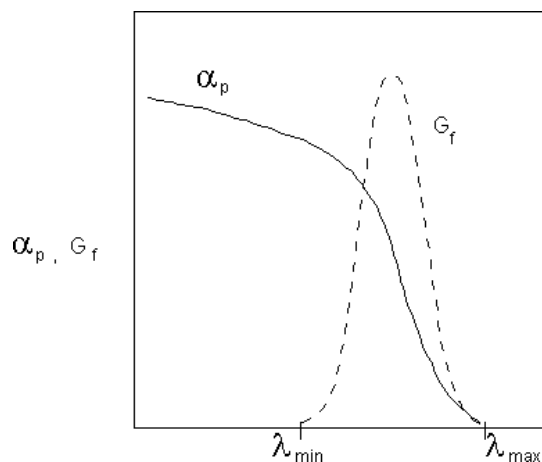
Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne w półprzewodnikach polega na generowaniu swobodnych nośników ładunku wskutek absorpcji promieniowania optycznego. Wyróżnia się dwa podstawowe mechanizmy:

- międzypasmowy prowadzący do uwolnienia elektronu i dziury,
- domieszkowy prowadzący do uwolnienia elektronu lub dziury.

Mechanizm absorpcji międzypasmowej zachodzi wówczas, gdy energia fotonu $W_f = h\nu$ jest większa od szerokości pasma zabronionego W_g półprzewodnika, a mechanizm absorpcji domieszkowej, gdy energia W_f będąc mniejsza od W_g jest większa od energii W_j jonizacji domieszek w tym materiale. Stąd wynika długofalowy próg absorpcji promieniowania charakteryzowany największą długością fali promieniowania absorbowanego przez półprzewodnik (rejestrowanego przez detektor).

$$l_{\max} = hc / W_g \quad \text{lub} \quad l_{\max} = hc / W_j$$

Istnieje także minimalna długość fali promieniowania wykrywanego przez fotodetektor. Ograniczenie to jest spowodowane wzrostem współczynnika pochłaniania α_p w miarę zmniejszania długości fali promieniowania, wskutek czego promieniowanie mimo wzrostu energii fotonów, wywołuje coraz słabszą generację nośników, gdyż nie mogąc wnikać w głąb materiału jest absorbowane w coraz cieńszej warstwie przypowierzchniowej (Rys.1).



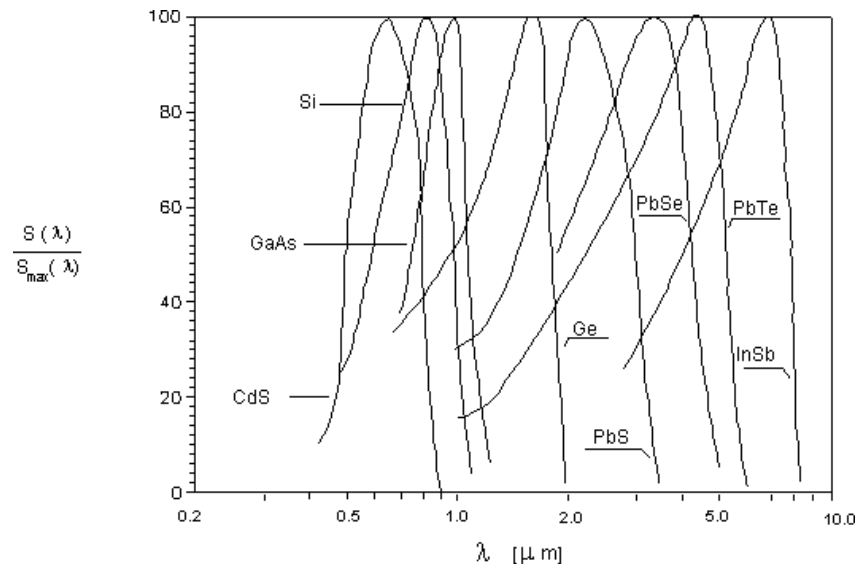
Rys.1. Zależność współczynnika pochłaniania α_p i fotoprzewodnictwa G_f półprzewodnika od długości fali absorbowanego promieniowania

Wzrost koncentracji swobodnych nośników ładunku wywołany oświetleniem półprzewodnika promieniowaniem o odpowiedniej długości fali przejawia się wzrostem przewodnictwa elektrycznego. To dodatkowe przewodnictwo jest nazywane fotoprzewodnictwem, w odróżnieniu od przewodnictwa tzw. ciemnego uwarunkowanego cieplnym wzbudzeniem nośników. Fotoprzewodnictwo występuje tylko w określonym przedziale widma promieniowania, różnym dla poszczególnych materiałów półprzewodnikowych.

W zjawisku fotoprzewodnictwa bardzo duże znaczenie ma fakt, że istnieją nośniki ładunku dodatniego i ujemnego (dwunośnikowy mechanizm przewodzenia prądu). Pozwala to na wytwarzanie dużych koncentracji nadmiarowych nośników ładunku i zachowanie jednocześnie wypadkowej neutralności elektrycznej nie tylko w całości układu, ale i lokalnie (warto tu zwrócić uwagę, że zjawisko fotoprzewodnictwa nie występuje w metalach, w których jest tylko jeden rodzaj nośników ładunku).

W takich fotodetektorach zawsze występują procesy fizyczne: wytworzenie nośników ładunku przez promieniowanie elektromagnetyczne padające na półprzewodnik, przeniesienie (transport) tych nośników przez obszar półprzewodnika do kontaktów metalowych łączących ten półprzewodnik z zewnętrznym obwodem elektrycznym, oraz oddziaływanie fotoprądu dopływającego do kontaktów z zewnętrznym obwodem elektrycznym. Charakter wymienionych procesów jest zwykle różny w poszczególnych typach detektorów półprzewodnikowych, warunkuje on parametry eksploatacyjne tych fotodetektorów, oraz określa możliwości ich zastosowań. Często można się spotkać z określeniem "czułość widmowa" lub "względna czułość widmowa". Chodzi tu o czułość prądową lub napięciową, jaka charakteryzuje detektor przy danej długości fali padającego promieniowania. Zwykle czułość widmową podaje się w postaci odpowiedniego wykresu $S(\lambda)$.

Przez względną czułość widmową rozumie się w tym przypadku czułość odniesioną do jej wartości maksymalnej: $S(\lambda)/S_{\max}(\lambda)$.



Rys.2 Przebieg względnej czułości widmowej kilku materiałów półprzewodnikowych, z których wytwarza się przyrządy fotoelektryczne.

Fotodiody

Przyrządy fotoelektryczne z warstwą zaporową tzw. fotodiody półprzewodnikowe, są to najogólniej biorąc, złącza pn, w których zakłócenia koncentracji nośników mniejszościowych dokonuje się za pomocą energii fotonów docierających do złącza przez odpowiednie okienko wykonane w obudowie fotodiody. Złącza pn fotodiod są wykonywane z różnych materiałów półprzewodnikowych, najczęściej stosuje się german (Ge), krzem (Si), oraz arsenek galowy (GaAs) i telurek kadmowy (CdTe). W obszarze warstwy zaporowej złącza pn zachodzą wskutek oświetlenia dwa zjawiska: powstaje siła elektromotoryczna (zjawisko fotowoltaiczne - fotoogniwo) oraz rośnie proporcjonalnie do padającego strumienia fotonów prąd płynący przez złącze pn w przypadku gdy złącze spolaryzowane jest w kierunku zaporowym (fotodiody).

Fotodiody pracują przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym. W stanie ciemnym (przy braku oświetlenia) przez fotodiody płynie tylko prąd ciemny, będący prądem wstecznym złącza określonym przez termiczną generację nośników. Oświetlenie złącza powoduje generację dodatkowych nośników i wzrost prądu wstecznego złącza, proporcjonalny do natężenia padającego promieniowania.

Parametry niektórych fotodiod zestawiono w tabeli (FG2 fotodiody germanowa, pozostałe krzemowe).

Typ	Parametry	dopuszczalne	S_1	parametry przy U_R	typowe zakres pracy	l_{opt}
	U_{max}	I_p				
	[V]	(P) [mA] ([mW])	$l=900$ nm [A/W]([$\mu A cm^2/mV$])	[V]	[nm]	[nm]
FG2	30	50	-	-	-	-
BPYP30	100	1.5	0.25	60	450-1100	800
BPYP35	100	1.5	0.25	60	450-1100	800
BPYP41	100	1.0	0.25	60	450-1100	800
BPYP44	100	1.5	0.5	45	400-1100	800
BPYP46	100	1.5	(45)	45	700-1100	900
BPSP34	32	(150)	0.55	10	400-1100	850

Fotodiody charakteryzują się dużą szybkością działania (znacznie większą niż fotorezystory i fototranzystory) dochodzącą do setek MHz. W zastosowaniach, w których wymagana jest duża szybkość działania stosuje się specjalne konstrukcje fotodiod: fotodiody pin i fotodiody lawinowe.

W fotodiodzie pin między domieszkowanymi obszarami p oraz n znajduje się warstwa półprzewodnika samoistnego i. W takiej strukturze warstwa zaporowa ma dużą grubość, równą w przybliżeniu grubości warstwy samoistnej, co powoduje że pojemność takiego złącza jest bardzo mała, z czym wiąże się mała bezwładność działania fotodiody.

Fotodioda lawinowa jest elementem pracującym w zakresie przebicia lawinowego złącza pn.

Jeżeli nośnik mniejszościowy np. elektron wytwarzający prąd nasycenia zostaje przyspieszony w polu elektrycznym złącza do energii kinetycznej równej lub większej $3/2 E_g$, może on przekazać część swojej energii elektronowi z pasma walencyjnego i zjonizować go do pasma przewodnictwa. W ten sposób następuje generacja pary elektron-dziura, a elektron zmniejsza swoją energię kinetyczną. Teraz mamy już 2 elektrony i 1 dziurę, które mogą nabywać energii w polu elektrycznym w złączu pn. Gdy one z kolei osiągną energie wynoszące $3/2 E_g$, każde z nich może wytworzyć następną parę elektron-dziura. Proces ten powtarza się wielokrotnie w sposób lawinowy. Przebicie lawinowe bywa często zlokalizowane w kilku obszarach zwanych "mikroplazmami". Każda mikroplazma działa w sposób przerywany, przewodząc prąd w postaci ciągu impulsów. Przebicie lawinowe zachodzi w postaci przypadkowych zrywów, których sumowanie wywołuje intensywne szumy w szerokim zakresie częstotliwości. W zakresie przebicia lawinowego prąd jest proporcjonalny do napięcia w potęgde zawierającej się w granicach od 3 do 6. Prąd wsteczny I_w może być wyrażony przy pomocy empirycznego wzoru:

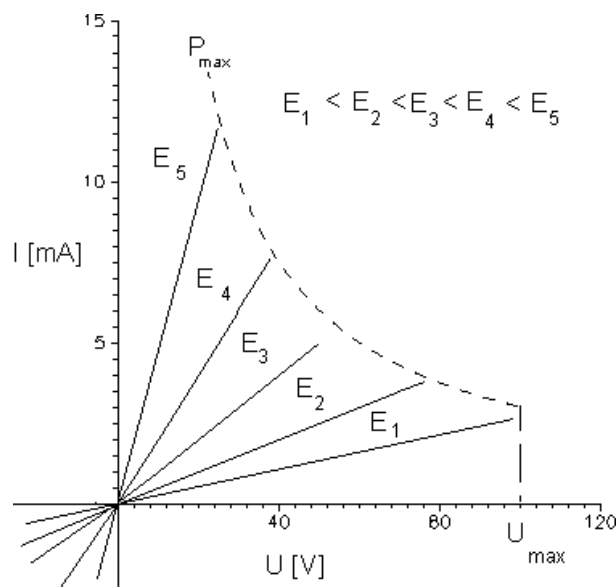
$$I_w = M I_0$$

przy czym I_0 jest prądem nasycenia, M współczynnikiem powielania.

Wskutek lawinowego powielania liczby nośników generowanych przez światło przyrost prądu spowodowany oświetleniem diody jest M -krotnie większy, przy czym M jest współczynnikiem powielania o wartości zależnej od napięcia polaryzacji fotodiody. Fotodiody lawinowe mają zwykle konstrukcje optymalizowane do detekcji promieniowania widzialnego zmodulowanego sygnałem wielkiej częstotliwości, a także szybko narastających impulsów tego promieniowania.

Fotorezystory.

Fotorezystorem nazywa się element półprzewodnikowy bezłączeniowy, który pod wpływem promieniowania świetlnego silnie zmienia swoją rezystancję. Część roboczą (światłoczułą) fotorezystora stanowi cienka warstwa półprzewodnika osadzona na podłożu dielektrycznym wraz z elektrodami metalowymi doprowadzającymi prąd ze źródła zewnętrznego. Całość umieszcza się w obudowie z okienkiem, służącym do przepuszczania promieniowania świetlnego. Strumień światła o odpowiedniej długości fali λ wywołuje generację par elektron-dziura, ta dodatkowa liczba elektronów i dziur zwiększa konduktywność półprzewodnika, co w rezultacie powoduje zmniejszenie rezystancji fotorezystora.



Rys.3 Charakterystyki prądowo napięciowe fotorezystora dla różnych wartości natężenia oświetlenia

Najczęściej można spotkać fotorezystory wykonane z takich materiałów jak: siarczek ołowiowy (PbS), telurek ołowiowy (PbTe), samoistny albo odpowiednio aktywowany german (Ge), antymonek indowy (InSb), oraz siarczek kadmowy (CdS). Charakterystykę rezystancyjno - oświetleniową przedstawia zależność rezystancji R_E fotorezystora od natężenia oświetlenia E może być opisana w przybliżeniu wzorem empirycznym:

$$R_E = R_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^g$$

gdzie R_0 jest rezystancją fotorezystora przy natężeniu E_0 (zwykle 10 lx), natomiast g jest współczynnikiem stałym, którego wielkość zależy głównie od rodzaju materiału półprzewodnikowego (dla CdS $g = 0.5-1$).

W praktyce zastosowania fotorezystorów jako detektorów promieniowania podstawowe znaczenie mają poniższe parametry techniczne:

Temperatura detektora T - przez temperaturę detektora rozumie się temperaturę jego aktywnego obszaru, a więc dla fotorezystorów temperaturę którą ma podczas pracy detektora warstwa półprzewodnika podlegająca oświetleniu.

Powierzchnia aktywnego obszaru detektora A - w przypadku fotorezystorów można w pewnym przybliżeniu powiedzieć że chodzi tu o wielkość powierzchni półprzewodnika podlegającą oświetleniu.

Parametry elektryczne związane z punktem pracy fotorezystora - dopuszczalne napięcie między końcówkami fotorezystora U_{max} , dopuszczalna moc elektryczna wydzielana w fotorezystorze P_{max} , prąd ciemny rezystora przy danym napięciu na jego zaciskach oraz napięcie określające punkt pracy.

Czułość detektora S - każdy detektor ma zakres pracy, w którym wartość sygnału wyjściowego jest proporcjonalna do wartości sygnału wejściowego. W tym zakresie stosunek tych wartości nazywa się czułością detektora. Dla detektorów promieniowania podaje się czułość prądową lub czułość napięciową. *Czułość prądowa* jest określona jako stosunek przyrostów zwarcowego prądu fotoelektrycznego do strumienia promieniowania padającego na detektor. *Czułość napięciowa* określa się jako stosunek przyrostów napięcia fotoelektrycznego występującego na rezystancji obciążenia (przy dopasowaniu) do strumienia promieniowania padającego na detektor. Jednostkami czułości detektorów promieniowania są odpowiednio ampery na wat lub wolty na wat .

Stała czasowa detektora - stała czasowa narastania sygnału; czas potrzebny do uzyskania $1-e^{-1}$ maksymalnej wartości sygnału (około 63%). Stała czasowa zanikania sygnału; czas potrzebny aby sygnał zmalał do e^{-1} jego wartości maksymalnej (około 37%).

POLITECHNIKA ŁÓDZKA
KATEDRA PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH I OPTOELEKTRONICZNYCH

W skróconym opisie fotorezystora zamiast charakterystyki $R_E(E)$ często podaje się wartości rezystancji ciemnej R_0 (tj. rezystancji jaka ma fotorezystor przy całkowicie zaciemnionej powierzchni czynnej) oraz rezystancji jasnej R_E dla określonej wartości natężenia oświetlenia E (najczęściej $E=1000$ lx). Do ważniejszych szczególnych parametrów fotorezystorów należą jeszcze: maksymalne dopuszczalne napięcie U_{max} i maksymalna moc rozpraszana przez element P_{max} oraz średni temperaturowy współczynnik czułości a_s .

Parametry produkowanych w Polsce fotorezystorów zestawiono w tabeli:

Typ	U_{max} [V]	P_{max} [W]	R_0 dla U		R_E [k Ω]	λ [nm]
			[MW]	[V]		
RPP111	500	0.1	100	100	10-50	580-680
RPP120	150	0.1	10	100	1-5	580-680
RPP121	110	0.1	10	50	0.1-0.5	580-680
RPP130	150	0.1	10	100	1-10	580-680
RPP131	110	0.1	10	50	0.4-1.2	580-680
RPP135	65+20%	0.1	0.033	50	0.025-0.05	580-680
RPP333	60	0.05	5	50	0.5-2	540-630
RPP550	350	0.6	1	100	0.04-0.2	580-680
RPYP63	30	-	0.3-2.5	-	-	1200-2400
RPYP63F	30	-	0.3-2.5	-	-	1200-2400
RPYP63W	30	-	0.3-2.5	-	-	1200-2100

2.Pomiary

Stanowisko pomiarowe.

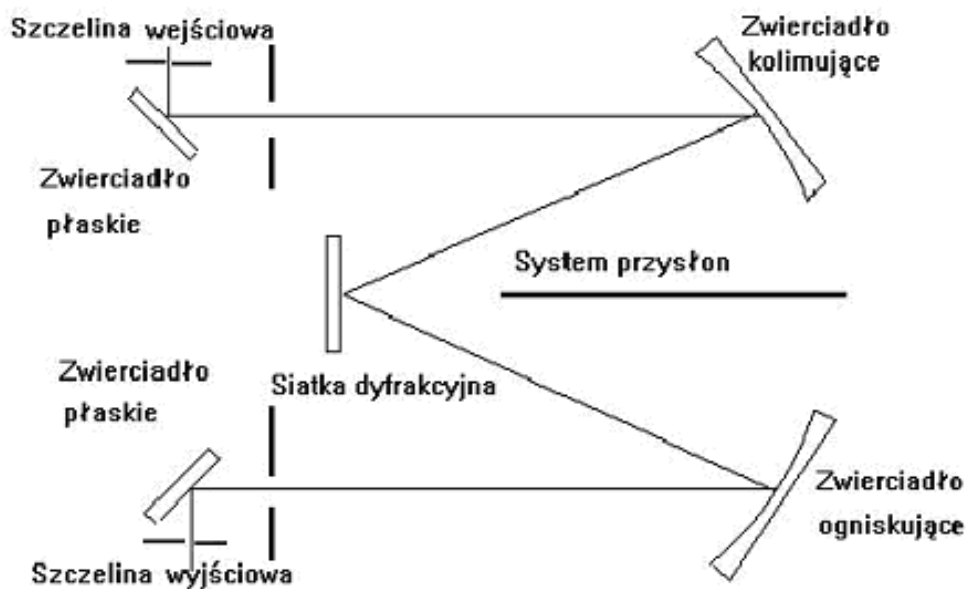
- Monochromator M250 (400-1200nm)
- Sterownik mikroprocesorowy monochromatora.
- Oprogramowanie.
- Oświetlacz z lampą ksenonową XBO 075
- Palnik ksenonowy XBO 075
- Zasilacz do palnika XBO 075

Monochromator:



Rys.4 Monochromator

(Monochromatory rodziny M250 są budowane w układzie Czerny-Turner'a o ogniskowej 1/4 m)



Rys.5 Układ soczewek

Monochromatory siatkowe rodziny M250 przeznaczone są do wyfiltrowania dowolnej linii w ultrafioletowym UV, widzialnym VIS lub podczerwonym IR zakresie widma. Opcje te są osiągalne dla monochromatorów z odpowiednimi siatkami dyfrakcyjnymi. Przyrządy mają wbudowane silniki krokowe umożliwiające automatyczne rozwijanie widma w czasie. Opcja ta wymaga dodatkowego wyposażenia w Kartę SK300, lub Sterownik 841, lub Sterownik 020.

Dane techniczne:

- ogniskowa 250 mm
- otwór względny: 1/5
- szczeliny regulowane płynnie w przedziale 0 do 3mm
- z rozdzielczością 0,01mm, wysokość szczelin 20mm
- odczyt długości fali z licznika cyfrowego z rozdzielczością 0,1nm
- możliwość sterowania monochromatorem za pomocą komputera.
- gabaryty przyrządu: 290 x 220 x 175(wysokość)
- waga około 12 kg

Monochromatory produkowane są w następujących wersjach:

Typ	Zakres spektralny [nm]	Dyspersja [nm/mm]	Dokładność Ustawień - licznika [nm]	Dokładność ustawień - komputera [nm]	Dokładność wskazań [nm]
M250/1800/UV	200-800	1,9	0,1	0,05	± 0,5
M250/1800/VIS	200-800	1,9	0,1	0,05	± 0,5
M250/1200/750	400-1200	3,2	0,1 x 1,5	0,075	± 0,8
M250/1200/1000	600-1400	3,2	0,1 x 1,5	0,075	± 0,8
M250/600/750	400-2000	6,4	0,1 x 3	0,15	± 1,0
M250/600/100	600-2400	6,4	0,1 x 3	0,15	± 1,0

Dokładność ustawienia licznika

Monochromatory wyposażone są w mechaniczny wskaźnik długości fali. Wskazania licznika dla monochromatorów z siatką 1800 linii/mm odpowiadają danej długości fali. dla monochromatorów z innymi siatkami wskazanie licznika należy pomnożyć przez stały współczynnik; 1,5 dla siatki 1200 linii/mm i 3 dla siatki 600 linii/mm.

Dokładność ustawienia komputera

Opcja jest dostępna tylko przy pracy monochromatora z komputerem. Umożliwia ona skalowanie monochromatora przez użytkownika za pomocą lamp spektralnych emitujących ściśle określone linie monochromatyczne w wymaganym zakresie spektralnym. Po kalibracji wskazania licznika monochromatora mogą odbiegać od wskazań komputera. Wskazania komputera są dokładniejsze.

Badane przyrządy.

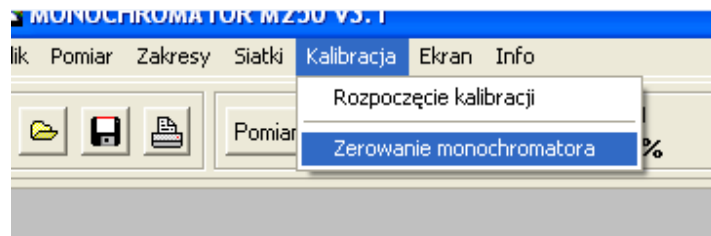
- Fotodioda
- Fotorezystor

Przebieg pomiarów.

UWAGA! Przed przystąpieniem do pomiarów należy koniecznie zapoznać się z podpunktem „Kalibracja monochromatora”!!!

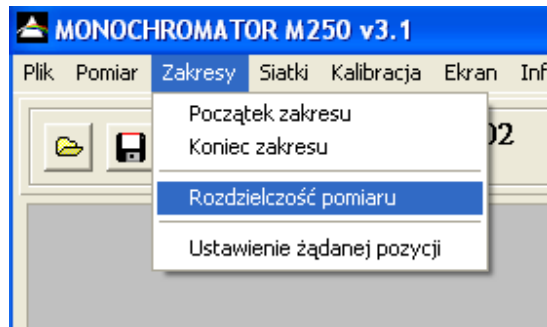
Kalibracja monochromatora:

1. Przed rozpoczęciem każdego pomiaru należy wyzerować monochromator. Dokonujemy tego otwierając zakładkę „Kalibracja” a następnie wybierając opcję „Zerowanie monochromatora”. Tak jak na rysunku Rys.19. **UWAGA! W razie niewykonania tego punktu może dojść do uszkodzenia monochromatora.**



Rys.19
Zerowanie monochromatora.

2. Wchodząc w zakładkę „Zakresy” ustawiamy początek zakresu pomiaru (nie mniejszy niż 300nm) oraz koniec zakresu pomiaru (nie większy niż 1200nm). Rozdzielczość pomiaru odpowiada za częstotliwość próbkowania uzyskiwanej charakterystyki.
3. **W czasie prowadzenia pomiaru NIE UŻYWAMY przycisku STOP!**



Rys.20 Ustawianie zakresów pomiarowych.

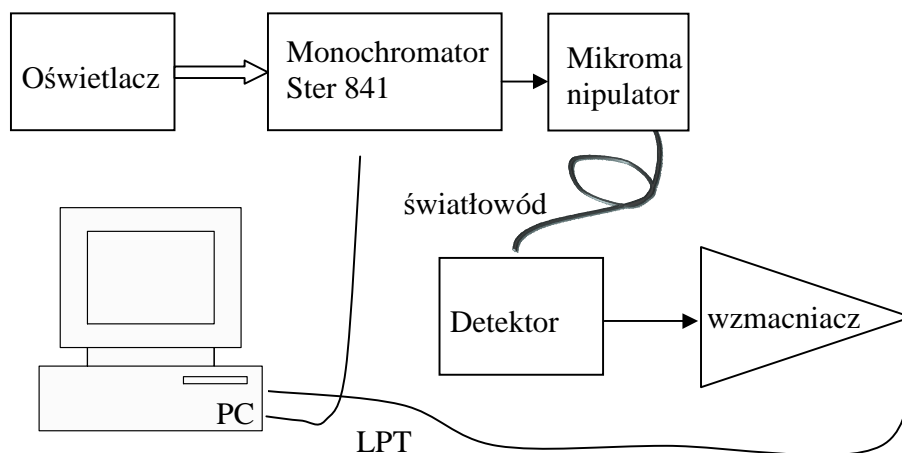
Wyznaczenie charakterystyki $I_D=f(U_D)$ fotodiody przy zadanym natężeniu oświetlenia

W tym punkcie badać będziemy wartość prądu płynącego przez fotodiode w zależności od wartości natężenia oświetlenia padającego na nią.

UWAGA!!! Przed przystąpieniem do pomiaru zapoznać się z punktami 1-3 oraz uwagą zamieszczoną pod nimi!!!

1. Oświetlenia zmieniać za pomocą zasilacza lampy halogenowej.
2. Badane napięcia to 8V, 11V, 13V, 15V. **Zmieniamy je na zasilaczu lampy, a nie na zasilaczu układu!!**
3. Na zasilaczu układu ustawiamy napięcie 8V. Należy koniecznie nacisnąć przycisk output.

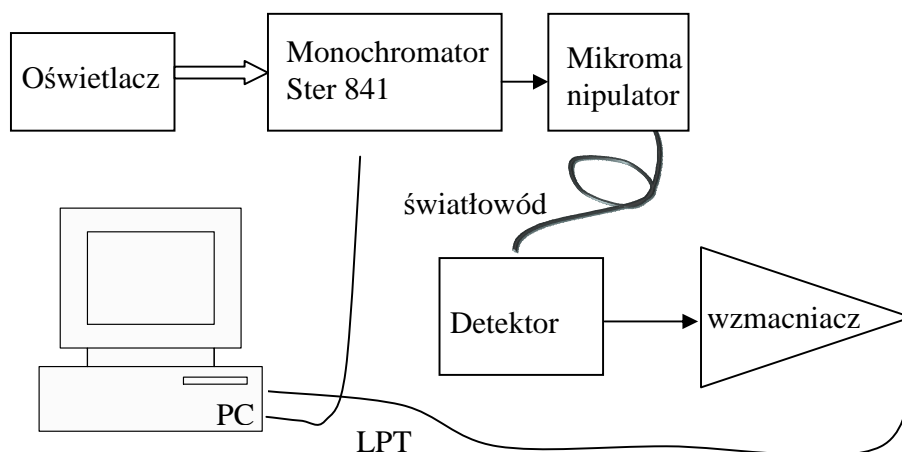
UWAGA!!! Ponieważ lampa halogenowa nagrzewa się jeśli nie prowadzimy pomiaru należy zmniejszyć napięcie na zasilaczu lampy do minimum!!!



Rys.7 Stanowisko pomiarowe

Wyznaczenie charakterystyki detekcyjności widmowej $I_D=f(\lambda)$ fotodiody

Badanie detekcyjności polega na sprawdzeniu czułości diody na poszczególne długości promieniowania. W tym celu ustalamy stały strumień oświetlenia natomiast przy pomocy monochromatora zmieniamy długości fal padającego promieniowania. Dla naszego monochromatora należy wykonać szereg pomiarów z przedziału 400 – 1200 nm (np. co 100 nm).



Rys.8 Stanowisko pomiarowe

Wyznaczenie charakterystyki detekcyjności widmowej $R_f(\lambda)$ fotorezystora

W tym punkcie pomiary będziemy wykonywać podobnie jak w poprzednim punkcie z tą jedynie różnicą, że badać będziemy zmianę rezystancji fotorezystora dla różnych długości fal promieniowania.

3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić:

1. Charakterystyki $I_D=f(U_D)$ fotorezystora, i fotodiody w formie tabel i wykresów.
2. Obserwacje i wnioski odnośnie powyższych pomiarów
3. Charakterystyki detekcyjności widmowej fotorezystora, i fotodiody.
4. Wnioski odnośnie tych charakterystyk.