

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

INSTYTUT FIZYKI

LABORATORIUM
FIZYKI FAZY SKONDENSOWANEJ

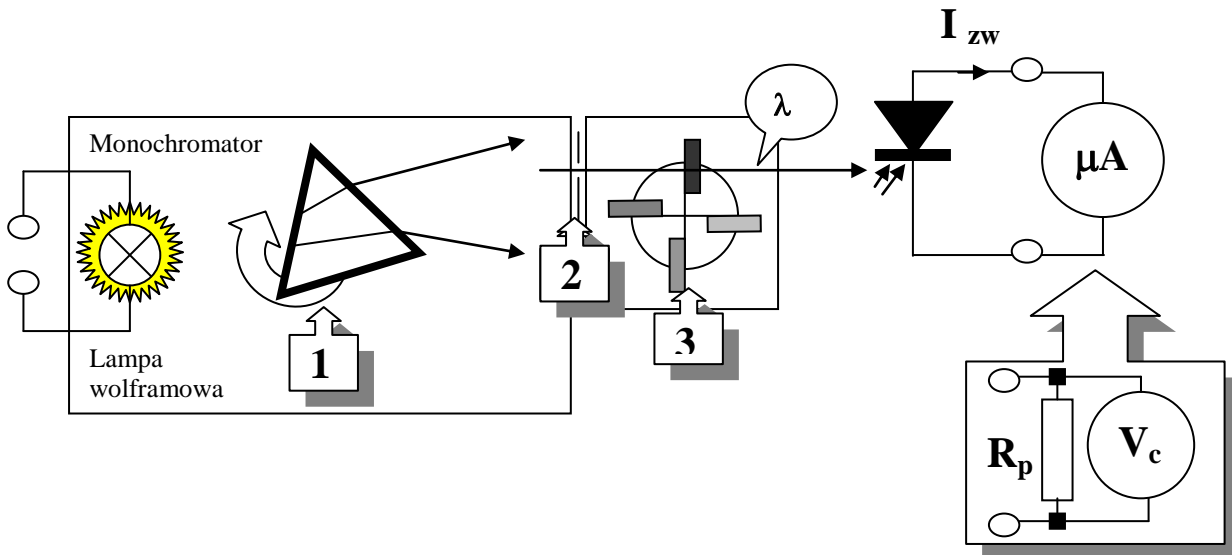
Ćwiczenie 4

Efekt fotowoltaiczny i fotoprzewodnictwo
Badanie fotodiody i fotoopornika

Cel ćwiczenia

Badanie fotodiody

1. W układzie przedstawionym na rys.1 dokonać pomiaru charakterystyki spektralnej fotodiody $I_{zw} = f(\lambda)$, pracującej jako fotoogniwo. Mierzmy prąd zwarciaowy I_{zw} fotodiody oświetlanej światłem o różnych długościach fal.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyki spektralnej fotodiody.

Schemat optyczny monochromatora przedstawia rys. .

- 1- pokrętko ustawiania długości fali światła λ (nm)
- 2- pokrętko ustawiania szerokości szczeliny wyjściowej monochromatora
- 3- manipulator zestawu filtrów szarych do ustalania natężenia światła wychodzącego z monochromatora.

Przebieg pomiarów :

- wyjąć zestaw filtrów z monochromatora
- pokrętkiem (2) monochromatora ustawić szerokość szczeliny wyjściowej na 1 mm
- pomiary rozpocząć od strony fal długich i przeprowadzić w całym zakresie dostępnych długości fal. **Dokładnie uchwycić długofalowy próg fotoprądu.**
- mierzone wartości odczytywać po ustaleniu się wskazań miernika.

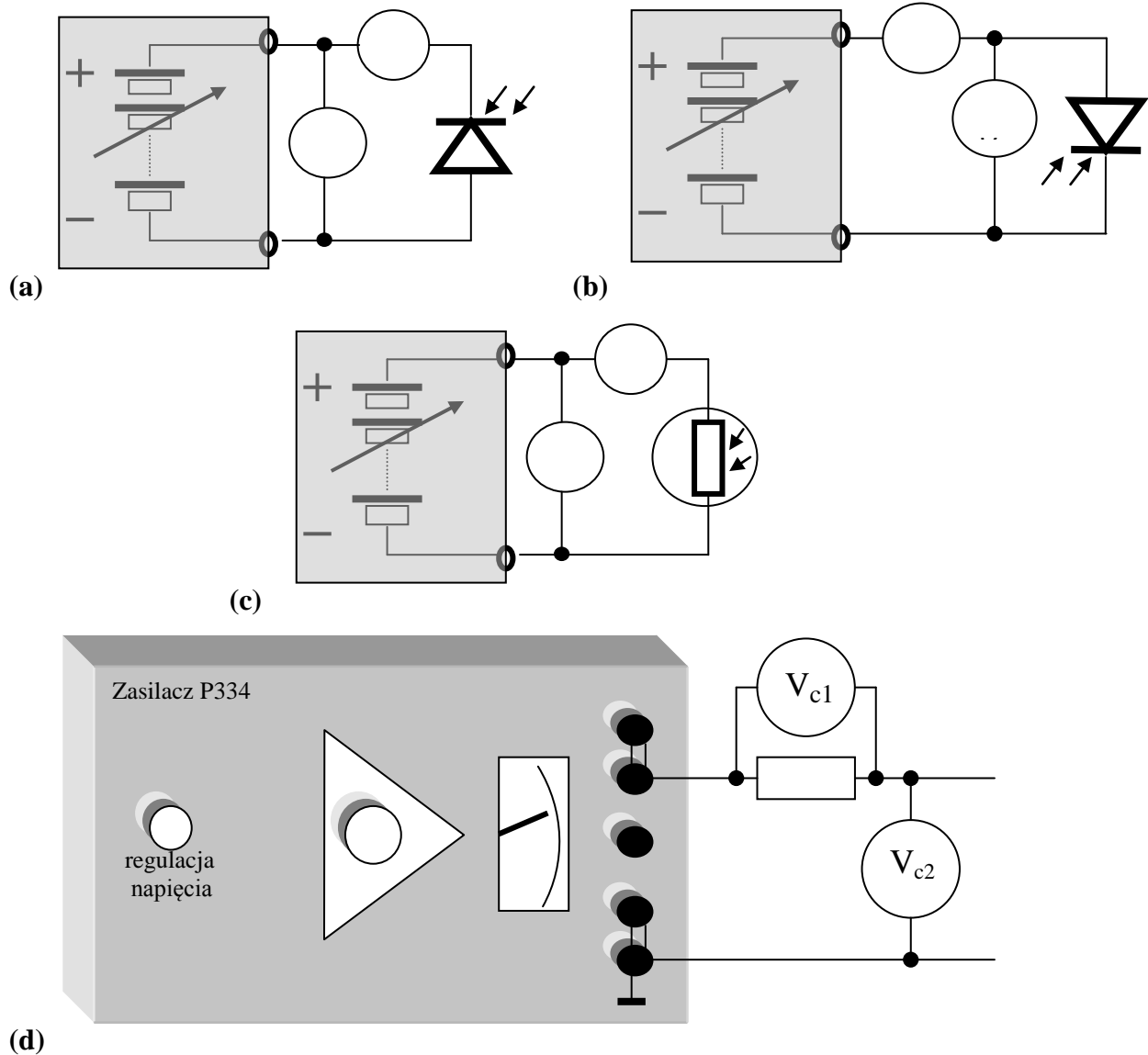
Uwaga : pomierzone wartości fotoprądu należy skorygować posługując się Tabelą 1; w celu ułatwienia opracowania wyników tych pomiarów należy dobrać długości fal takie jak w tabeli.

2. W układzie przedstawionym na rys.1.dokonać pomiarów charakterystyk oświetleniowych fotodiody.

Przebieg pomiarów :

- włożyć zestaw filtrów do monochromatora
- ustawić szerokość szczeliny wyjściowej na 2 mm
- oświetlić fotodiody światłem o długości fali odpowiadającej maksymalnej wartości fotoprądu

- dokonać pomiarów prądu zwarcowego $I_{zw} = f(\Phi)_{\lambda = \text{const}}$ oraz siły fotoelektromotorycznej (**fotodioda rozwarsta**) $U_{fe} = f(\Phi)_{\lambda = \text{const}}$ – oświetlenie zmieniać operując manipulatorem (3) zestawu filtrów szarych (przepuszczalność tych filtrów zestawiona jest w Tabeli 2)
3. W układzie przedstawionym na rys.2. dokonać pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych fotodiody.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyk prądowo-napięciowych fotodiody (a) – w kierunku zaporowym (b) – w kierunku przewodzenia oraz (c) - fotoopornika . Jeśli zastosować specjalny zasilacz o zmiennej polaryzacji napięcia i płynnym przechodzeniu napięcia przez zero, to można posłużyć się uniwersalnym układem (d), w którym ponadto:

- V_{c2} pełni funkcję miernika napięcia na badanym elemencie
- V_{c2} wraz z opornikiem wzorcowym R_{wz} pełni funkcję amperomierza (woltomierz V_{c2} mierzy spadek napięcia na oporniku – napięcie jest proporcjonalne do prądu przepływającego przez opornik). Przez woltomierz prąd praktycznie nie płynie, gdyż oporności wejściowe stosowanych woltomierzy cyfrowych są rzędu $10^7 \div 10^8 \Omega$.

Przebieg pomiarów :

- w konfiguracji do badania fotodiody w kierunku zaporowym odłączyć jedno z połączeń prowadzących do anody lub katody i wykonać pomiary prądu (płynącego przez woltomierz cyfrowy V_{c1}) wraz z pomiarami odpowiadających im napięć. **Dane te umożliwią dokonanie korekt w wyznaczeniu charakterystyk fotodiody, gdyż w tej konfiguracji rezystancja wewnętrzna fotodiody jest porównywalna z rezystancją woltomierza cyfrowego mierzącego napięcie U_{AK} .**
 - ustawić szerokość szczeliny równą 2 mm oraz długość fali odpowiadającą maksimum fotoczułości
 - dołączyć badaną fotodiodę i wykonać serie około 10-ciu pomiarów (w obu kierunkach) dla :
 - fotodiody zasłoniętej (płynie wówczas tzw. prąd ciemny)
 - fotodiody oświetlonej poprzez filtry szare
 - fotodiody oświetlonej bezpośrednio z pominięciem filtrów
- Uwaga : nie przekraczać napięć 45V w kierunku zaporowym oraz prądów 1 mA w kierunku przewodzenia.**

Badanie fotoopornika

1. W układzie przedstawionym na rys.2c. (lub 2d) przy ustalonym napięciu zasilającym (z przedziału 5÷8V) dokonać pomiarów następujących charakterystyk fotoopornika :
 - charakterystyki spektralnej $I_{f0} = f(\lambda)$
 - charakterystyki oświetleniowej $I_{f0} = f(\Phi)_{\lambda = \text{const}}$
 2. W układzie z rys.2d. dokonać pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych $I_{f0} = f(U_{f0})$
- Uwaga : powyższe pomiary dokonywane są przy szczelinie wyjściowej 2 mm , pomiary wykonywane są dla długości fal odpowiadających maksimum fotoczułości, pomiary wykonywane są przy pełnym oświetleniu oraz z użyciem filtrów i przy zasłonięciu fotoopornika (prąd ciemny).**
- Należy zwracać uwagę aby nie przekroczyć mocy wydzielanej w fotooporniku powyżej 0,1 W i aby nie przekraczać napięć 20 V.

Opracowanie wyników pomiarów

1. Wykonać następujące wykresy charakterystyk spektralnych (widmowych) fotodiody krzemowej (Si) i fotoopornika z siarczku kadmu (CdS) :
 - w liniowym układzie współrzędnych:
 - $S_{\lambda} = f(E_{fot})$
 - $S'_{\lambda} = f(E_{fot})$
 - $S_{\lambda w} = f(\lambda)$
 - w półlogarytmicznym układzie współrzędnych:
 - $\log(S_{\lambda}) = f(E_{fot})$
 - $\log(S'_{\lambda}) = f(E_{fot})$
- gdzie: E_{fot} – energia fotonu oświetlającego badany fotoelement (E_{fot} wyrażamy w eV),
 S_{λ} - czułość widmowa fotoelementu odniesiona do tego samego strumienia światła oświetlającego fotoelement, S'_{λ} - czułość widmowa odniesiona do tej samej liczby fotonów, $S_{\lambda w}$ – względna czułość widmowa.
- Z niskoenergetycznej granicy fotoczułości S_{λ} (także z S'_{λ} i $S_{\lambda w}$) wyznaczyć:

- optyczną szerokość strefy energii wzbronionej dla krzemu (z charakterystyk fotodiody)
- odległość poziomu lokalnego domieszki (miedzi) od dna pasma przewodnictwa w siarczku kadmu.

Określić długość fali λ dla maksymalnej fotoczułości.

Należy przyjąć:

$$E_{\text{fot}} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} [eV] \quad (\text{zapisując } \lambda \text{ w nanometrach})$$

$$S_{\lambda} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{\text{zw}}}{\Phi_{\lambda}} \quad , \text{ będa} \text{c} \text{a, dla fotodiody, stosunkiem}$$

fotoelektrycznego prądu zwarcia (I_{zw}) do oświetlającego strumienia (Φ_{λ}) monochromatycznego promieniowania o długości fali λ

$$S_{\lambda} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{\text{fo}}}{\Phi_{\lambda} \cdot U} \quad , \text{ będa} \text{c} \text{a, dla fotoopornika, stosunkiem}$$

fotoprądu (I_{fo}) do oświetlającego strumienia (Φ_{λ}) przy napięciu U przyłożonym do fotoopornika

$$S_{\lambda} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda \text{ max}}} \quad , \text{ będa} \text{c} \text{a, stosunkiem czułości widmowej do}$$

maksymalnej czułości widmowej

$$S'_{\lambda} = S_{\lambda} \cdot E_{\text{fot}}$$

S_{λ} będzie prezentowane na wykresach w jednostkach względnych, jeśli na osi rzędnych odłożone będą wielkości I_{zw}/J oraz I_{fo}/J odpowiednio dla fotodiody i fotoopornika (przez I_{fo} rozumiemy różnicę między fotoprądem mierzonym w fotooporniku oświetlonym, a prądem ciemnym przy tym samym napięciu). Wartości J podano w **Tabeli 1**.

Prezentuje ona wartości względne natężenia światła pomierzone przyrządem jednakowo czułym na wszystkie długości fal – **termoelementem**.

$$J = \Phi/S \rightarrow J \sim \Phi \quad (\text{dla stałej wartości powierzchni oświetlenia } S).$$

Wyprowadzenie wzoru na $J(\lambda)$:

Źródłem światła w monochromatorze jest żarowa lampa wolframowa o (w przybliżeniu) planckowskim rozkładzie zdolności emisyjnej w funkcji długości fali $R(\lambda)$. Rozłożenie światła wg długości fal realizujemy w układzie optycznym monochromatora, przy czym wielkość przedziału spektralnego $d\lambda$ światła wychodzącego z monochromatora, zależy od szerokości szczeliny wyjściowej b oraz od dyspersji przyrządu $D(\lambda)$. Zatem

$$d\lambda = b \cdot D(\lambda)$$

$$\text{gdzie} \quad D(\lambda) = \frac{\Delta\lambda}{\Delta x} \left[\frac{\text{Å}}{\text{mm}} \right] \quad , \text{ jest dyspersją liniową równą}$$

stosunkowi różnicy długości fal ($\Delta\lambda$) linii widmowych do odległości tych linii (Δx) w płaszczyźnie widma.

Ilość energii świetlnej dE przechodzącej przez szczelinę wyjściową monochromatora

Dla małych wartości b i stałej geometrii układu zachodzi proporcjonalność:

$$\Phi \sim J \sim dE$$

2. Wykonać następujące wykresy charakterystyk oświetleniowych fotodiody i fotooporu:

- charakterystykę prądowo-oświetleniową fotodiody $I_{fd}(\Phi)$ w skali logarytmicznej $\lg I_{fd}(\lg \Phi)$
- charakterystykę napięciowo-oświetleniową fotodiody w obszarze pracy fotowoltaicznej w skali liniowej $U_{fdv}(\Phi)$ i półlogarytmicznej $U_{fdv}(\lg \Phi)$
- charakterystykę prądowo-oświetleniową fotoopornika $I_{fo}(\Phi)$ w skali logarytmicznej $\lg I_{fo}(\lg \Phi)$.

Wyliczyć współczynniki kierunkowe z wykresów charakterystyk prądowo-

oświetleniowych dla fotodiody $k_{fd} - \left(\frac{\Delta \lg(I_{zw})}{\Delta \lg(\Phi)} \right)$ i fotoopornika $k_{fo} - \left(\frac{\Delta \lg(I_{fo})}{\Delta \lg(\Phi)} \right)$.

Uwaga: Oświetlenie Φ regulowane w pomiarach przy pomocy filtrów szarych wyrażamy przez przepuszczalność światła przez te filtry (**Tabela 2**) – w ten sposób Φ wyrażone jest w jednostkach względnych.

Wykonując wykresy w skali logarytmicznej postępujemy tak, aby przedział zmienności jednego rzędu był jednakowy dla obu osi współrzędnych.

3. Wykreślić charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiody i fotoopornika (oświetlonych i nieoświetlonych), a z prostoliniowych odcinków charakterystyk wyznaczyć ich opory – przed i po oświetleniu.

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Zakres obowiązującego materiału

Fotoprzewodnictwo i efekty fotowoltaiczne w złączu **p-n** :

- generacja i rekombinacja nośników w złączu **p-n**
- czas życia nośników
- zależności prądowo-oświetleniowe i prądowo-napięciowe dla fotodiody i fotoopornika
- zależność widmowa absorpcji światła i fotoprzewodnictwa
- zastosowania fotodiod i fotooporników

Literatura

1. A. Świt, J. Półtorak – Przyrządy półprzewodnikowe , NT 1979
2. J. Pankow – Zjawiska optyczne w półprzewodnikach , PWN 1974
3. G. Streeman – Przyrządy półprzewodnikowe , NT 1976
4. P. Kirjejew – Fizyka półprzewodników , PWN 1971
5. K. Szalimowa – Praktikum po półprzewodnikach , 1968
6. K. Szalimowa – Fizyka półprzewodników , PWN 1974
7. J. J. Loterski – Zjawisko fotowoltaiczne i szerokie wykorzystanie energii słonecznej ,
Postępy fizyki , tom 26 , zeszyt 1975
8. Van der Zell – Podstawy fizyczne elektroniki ciała stałego
9. J. Cieślak – Półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne , PWN 198
10. C. M. Rywkin – Fotelektricheskie Jawlenija w półprzewodnikach , Moskwa 19
11. R. Biub – Fotoprowodimost twiodych tiel , Moskwa 1962
12. C. J. Jepifanow – Fizyczne podstawy mikroelektroniki , NT 1976
13. A. Ambroziak – Konstrukcja i technologia przyrządów fotoelektrycznych , 1965

~~~~~

**Tabela 1**

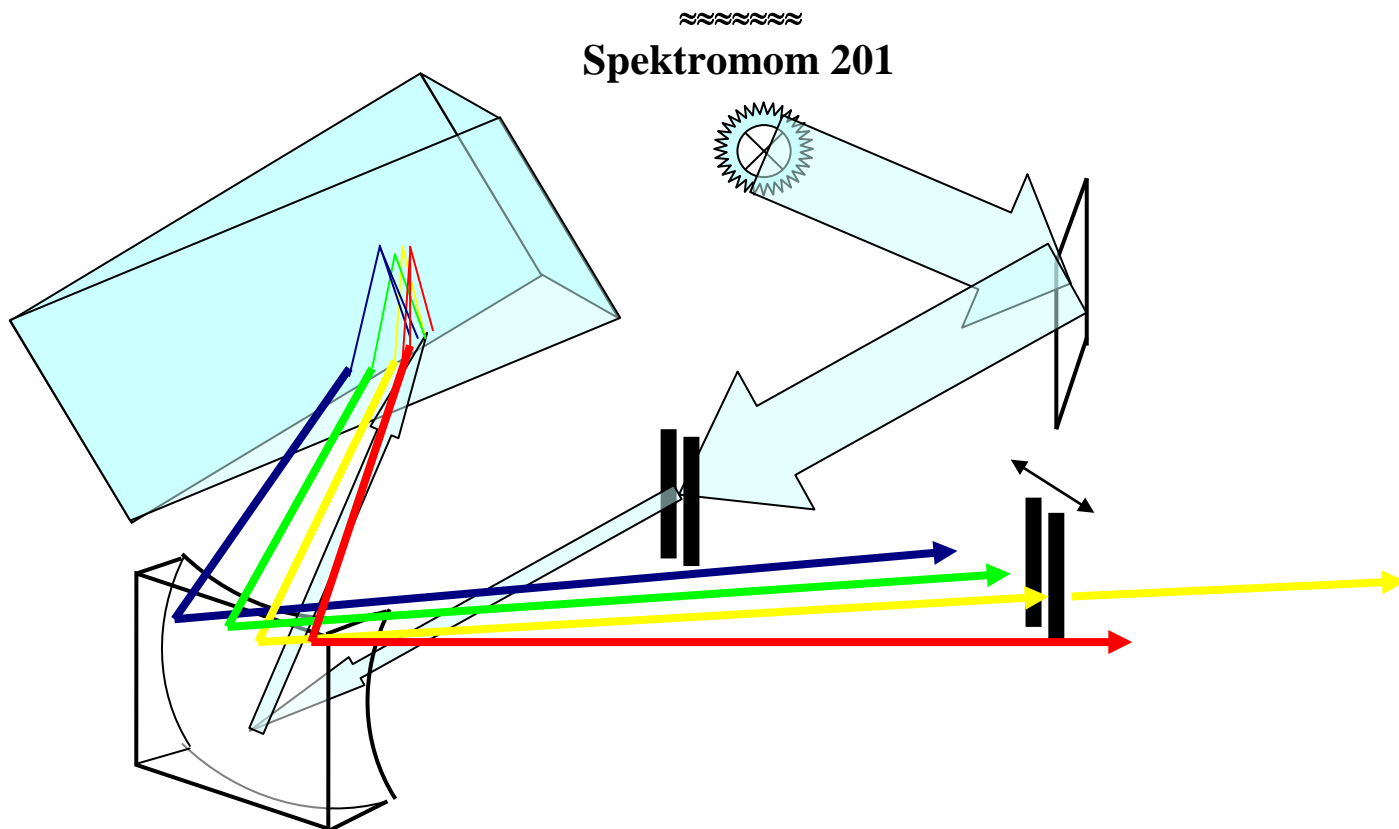
Tabela zależności natężenia światła **J** wychodzącego z monochromatora „Spektromom 201” od długości fali światła. Zależność dotyczy świecenia lampy wolframowej, zasilanej napięciem 6V, przez szczelinę o szerokości 2 mm. Określenie „j.w.” jest skrótem terminu „jednostki względne”

| $\lambda$ (nm) | J (j.w.) | $\lambda$ (nm) | J (j.w.) | $\lambda$ (nm) | J (j.w.) | $\lambda$ (nm) | J (j.w.) | $\lambda$ (nm) | J (j.w.) |
|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 450            | 1        | 650            | 9        | 850            | 21       | 1050           | 32       | 1200           | 28       |
| 500            | 2        | 700            | 11       | 900            | 25       | 1075           | 34       | 1250           | 25       |
| 550            | 4        | 750            | 12       | 950            | 29       | 1100           | 32       | 1300           | 25       |
| 600            | 7        | 800            | 16       | 1000           | 31       | 1150           | 30       |                |          |

**Tabela 2**

Przepuszczalność filtrów szarych ( wyrażona w % ) w funkcji długości fali światła wychodzącego z monochromatora dla kolejnych położenia manipulatora zestawu filtrów.

| $\lambda$ (nm) | Poz.1 | Poz.2 | Poz.3 | Poz.4 | $\lambda$ (nm) | Poz.1 | Poz.2 | Poz.3 | Poz.4 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 400            | 0.1   | 0.5   | 3.2   | 11    | 560            | 0.6   | 1.2   | 4.2   | 20    |
| 420            | 0.2   | 0.7   | 3.2   | 15    | 580            | 0.6   | 1.2   | 4.0   | 19    |
| 460            | 0.3   | 0.9   | 3.4   | 17    | 600            | 0.6   | 1.2   | 4.2   | 18    |
| 480            | 0.5   | 1.3   | 3.9   | 20    | 650            | 1.0   | 1.6   | 5.0   | 19    |
| 500            | 0.6   | 1.3   | 4.2   | 20    | 700            | 2.2   | 3.0   | 7.6   | 24    |
| 520            | 0.6   | 1.2   | 4.0   | 19    | 750            | 3.4   | 3.9   | 9.2   | 25    |
| 540            | 0.6   | 1.2   | 4.2   | 19    | 800            | 3.8   | 4.0   | 9.6   | 23    |



Rys.3. Schemat optyczny monochromatora „Spektromom 201”