

## ĆWICZENIE 50

### ZEWNĘTRZNE ZJAWISKO FOTOELEKTRYCZNE

#### I. Wprowadzenie

Promieniowanie elektromagnetyczne padające na środowisko wypełnione gazem, cieczą lub ciałem stałym może ulec rozproszeniu ( w szczególnym przypadku odbiciu), absorpcji. Przez ośrodki przezroczyste przenika. Część promieniowania oddziałuje z elektronami środowiska a część z cząsteczkami. Energia promieniowania najczęściej przekształca się w energię wewnętrzną ośrodka co ujawnia się wzrostem temperatury.

Jeżeli promieniowanie oddziałuje z elektronami, wówczas może dojść do:

1. emisji elektronów z napromieniowanego ciała stałego lub cieczy do otaczającej przestrzeni;
2. jonizacji atomów i cząsteczek gazów;
3. wzrostu przewodności lub pojawienia się efektu fotowoltaicznego w ciałach stałych.

Zjawiska te znane są jako zewnętrzny i wewnętrzny efekt fotoelektryczny.

Generalnie rzecz biorąc mamy tu do czynienia z oddziaływaniem elektromagnetycznym. Cechą charakterystyczną tego oddziaływania jest obecność ładunków elektrycznych i fotonów - cząstek bezmasowych i elektrycznie obojętnych poruszających się z prędkością światła. Jeżeli w jakimkolwiek procesie pojawiają się fotony, ładunki elektryczne, lub jedno i drugie, wówczas mamy oddziaływanie elektromagnetyczne.

W zjawiskach fotoelektrycznych następuje wymiana ładunków elektrycznych (elektronów) i fotonów, a zatem wyjaśnienia zjawiska poszukiwać będziemy w mechanizmie oddziaływań elektromagnetycznych, którego natura ma charakter kwantowy.

Zjawisko fotoelektryczne jest niezrozumiałe z punktu widzenia falowej teorii promieniowania, ponieważ:

1. nie obserwujemy zapóźnienia procesu (fotoelektrony są emitowane natychmiast po naświetleniu ciała);
2. pojawienie się fotoelektronów zależy od częstotliwości progowej padającego promieniowania (dla zbyt małej częstotliwości fotoefekt nie zachodzi);
3. pojawienie się fotoelektronów nie zależy od natężenia padającego promieniowania (energia fali zależy od natężenia promieniowania - zatem fotoefekt nie jest zależny od energii promieniowania).

Foton można traktować jako cząstkę stowarzyszoną z falą elektromagnetyczną o określonej częstotliwości. Każdemu fotonowi możemy przypisać energię

$$E = h\nu, \quad /1/$$

gdzie:  $h$ - stała Plancka, a  $\nu$  -częstotliwość fali elektromagnetycznej z którą foton jest stowarzyszony. Każdemu fotonowi przyporządkowujemy również określony pęd

$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad /2/$$

gdzie:  $c$  - prędkość rozchodzenia się światła w próżni. Energię cząstki opisujemy znanym wzorem Einsteina

$$E = mc^2, \quad /3/$$

gdzie:  $m$  - oznacza masę cząstki.

Energia opisana wzorami /1/ i /3/ jest równoważna, stąd

$$m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad /4/$$

gdzie:  $m$  - jest masą elektrodynamiczną fotonu. Masa spoczynkowa  $m_0 = 0$ , co łatwo udowodnić korzystając ze znanej zależności na masę cząstki poruszającej się z prędkością  $V$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad /5/$$

Z zależności /1/, /2/, /4/ a także /5/ widać, że foton ma cechy charakterystyczne cząstce.

Foton obdarzony odpowiednią energią i pędem zderzając się z elektronem może przekazać mu energię ,być przez niego pochłonięty a energia przekazana elektronowi w wyniku czego opuści on środowisko (zostanie wybity), lub przejdzie na wyższy poziom energetyczny (wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne). Zakładamy, że oddziaływania te mają charakter jednofotonowy, tzn.: jeden foton oddziałuje z jednym elektronem. Nie każdy foton bombardujący środowisko oddziałuje z elektronami. Do oddziaływania między stosunkowo nielicznymi fotonami a elektronami dochodzi rzadko. Makroskopowo efekt ten jest określany jako wydajność fotoelektryczna. Zjawisko fotoelektryczne należy traktować statystycznie w kategoriach prawdopodobieństwa. Rządzą nim prawa mechaniki kwantowej. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności nie jesteśmy w stanie przewidzieć między którymi fotonami i elektronami, gdzie i kiedy dojdzie do oddziaływania.

Wyniki doświadczalne mają charakter statystyczny, ponieważ obejmują dużą liczbę niemierzalnych i nieobserwowalnych aktów jednostkowych.

Ciała stałe mają dobrze określoną powierzchnię, bardzo niską prężność pary nasyconej nad nią co pozwala na utworzenie głębokiej próżni w pobliżu nich. Efekty uboczne nie zakłócają zjawiska fotoelektrycznego.

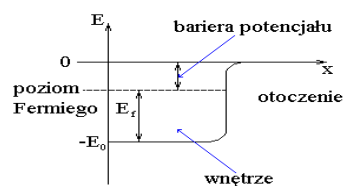
Stosunkowo łatwo wyobrazić sobie wnętrze metalu posługując się modelem studni potencjalnej. Z teorii ciała stałego wiadomo, że sieć krystaliczna metalu składająca się z dodatnich węzłów zanurzona jest w gazie

elektronowym utworzonym z elektronów przewodnictwa wspólnych dla wszystkich atomów tworzących kryształ. Elektrony wchodzące w skład gazu elektronowego mają cechy elektronów „swobodnych”. Wewnątrz metalu ich energia

$$E \leq E_f,$$

gdzie:  $E_f$  - jest energią tzw. poziomu Fermiego - wyznaczającego maksymalną energię elektronów w gazie elektronowym. Od otaczającej próżni, wewnątrz metalu oddziela bariera potencjału, której wysokość zależy od rodzaju substancji i temperatury. Jeżeli metal ma wyższą temperaturę, wówczas poziom Fermiego  $E_f$  jest odpowiednio wyższy a bariera potencjału niższa.

Zjawiska na granicy: wewnątrz metalu - otoczenie dobrze opisuje jama potencjału przedstawiona na rysunku /1/,



Rys.1.

gdzie:  $-E_0$  oznacza głębokość studni.

Foton o energii

$$E_{gr} = h\nu_{gr} = W \quad /6/$$

bombardujący powierzchnię metalu oddaje ją elektronom z poziomu Fermiego, dzięki czemu elektrony zdolne są wykonać pracę wyjścia  $W$  i opuścić wewnątrz metalu.

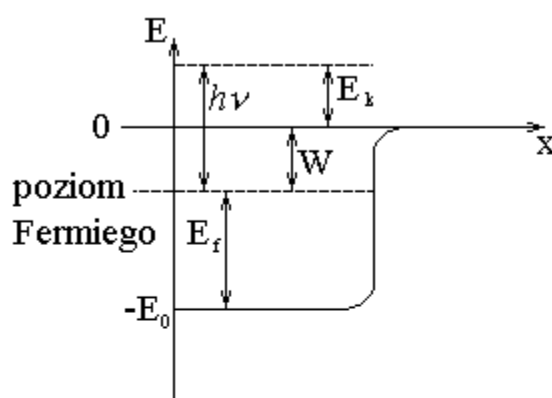
Jeżeli energia /1/ padających fotonów przekroczy energię bariery (osiągnie wartość pracy wyjścia), wówczas zgodnie z zasadą zachowania energii nadwyżka przekształca się w energię kinetyczną wybijanych elektronów.

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad /7/$$

Zasadę zachowania możemy zapisać w postaci równania Einsteina

$$h\nu = W + \frac{mV^2}{2}. \quad /8/$$

Na rysunku 2 ilustrujemy to w modelu jamy potencjalnej



Rys.2.

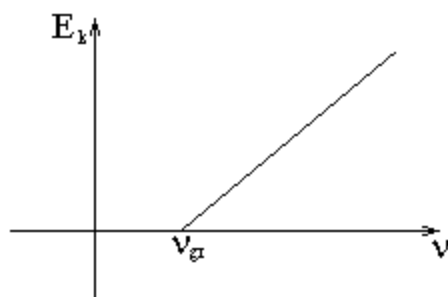
Jeżeli fotony o tej samej energii będą pochłaniane przez elektrony leżące poniżej poziomu Fermiego, wówczas energia kinetyczna fotoelektronów będzie niższa od  $E_k$ , ponieważ  $E_k$  jest najwyższą energią jaką mogą uzyskać elektrony pochłaniające fotony z promieniowania o częstotliwości  $\nu$ .

Analizując równanie /8/ łatwo dojść do otrzymanych empirycznie praw Lenarda.

Pokazaliśmy, że maksymalna energia kinetyczna wybitych fotoelektronów zależy od energii padających fotonów, a więc zależy od częstotliwości fali elektromagnetycznej stowarzyszonej z fotonami uczestniczącymi w zjawisku. Przekształcając /8/ otrzymamy

$$E_k = h\nu - W = h\nu - h\nu_{gr} \quad /9/$$

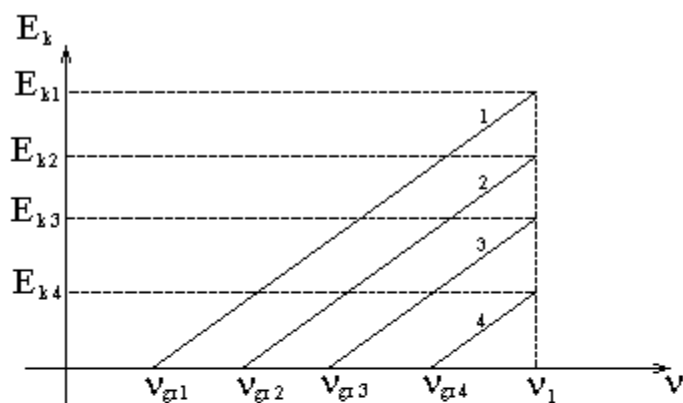
Jeżeli na osi rzędnych odłożymy energię kinetyczną elektronów a na osi odciętych częstotliwość promieniowania, wówczas otrzymamy graficznie zależność  $E_k = f(\nu)$  w postaci odcinka, gdzie tangens kąta nachylenia linii z dodatnim kierunkiem osi  $\nu$  jest wielkością stałą niezależną ani od częstotliwości ani od pracy wyjścia (częstotliwości granicznej) równą stałej Plancka.



Rys.3.

*Maksymalna prędkość wybitych fotoelektronów zależy od częstotliwości padającego promieniowania.* (pierwsze prawo Lenarda)

Dla różnych prac wyjścia  $E_k = f(\nu)$  da się przedstawić rodziną linii.



Rys.4.

Niech  $\nu_1$  oznacza maksymalną częstotliwość padającego promieniowania, wówczas maksymalne energie kinetyczne wybitych elektronów spełniają relacje

$$E_{k1} > E_{k2} > E_{k3} > E_{k4}$$

(patrz rysunek /4/.)

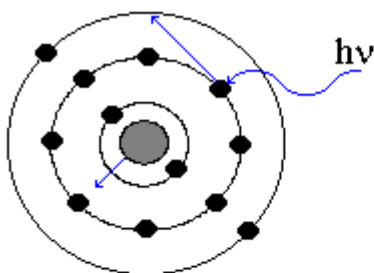
Z tego wynika, że prędkości maksymalne wybitych elektronów

$$v_{max1} > v_{max2} > v_{max3} > v_{max4}$$

Założenie jednofotonowego oddziaływania z elektronami i równanie /8/ prowadzi do drugiego prawa Lenarda:

*Liczba wybitych elektronów w jednostce czasu jest proporcjonalna do liczby padających fotonów (natężenia padającego promieniowania).*

Zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne w gazie ujawnia się w postaci jonizacji. Oddziaływania fotonów z elektronami zachodzą wewnątrz powłok elektronowych.



Rys.5.

Pęd fotonu przekazywany jest elektronowi i jądro atomu.

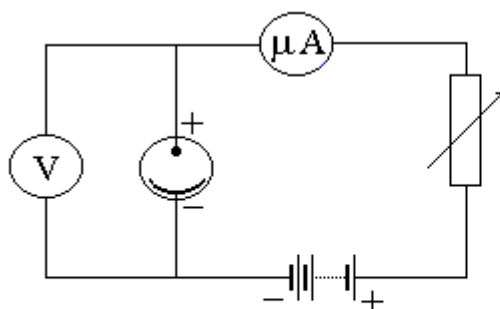
Praca wyjścia zależy od energii wiązania elektronu w atomie.

Bardzo trudno obserwować zjawiska fotoelektryczne w cieczech, ponieważ nad każdą powierzchnią cieczy znajduje się jej para, która bardzo utrudnia obserwację.

## II Fotokomórki

Zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne zostało wykorzystane w urządzeniach zwanych fotokomórkami. Dzielimy je na próżniowe i gazowane. najczęściej fotokomórka próżniowa składa się z bańki szklanej z której usunięto gaz oraz dwóch elektrod: fotokatody i anody. Fotokatodą jest warstwa substancji naniesionej na wewnętrzną ścianę bańki szklanej, zazwyczaj specjalnie aktywowana, dzięki czemu uzyskuje się dużą powierzchnię czynną. Materiał fotokatody charakteryzuje się małą pracą wyjścia. Anoda w fotokomórkach ma kształt pręta lub pierścienia. Materiał bańki ogranicza zastosowanie fotokomórki dla fal krótkich (szkło nie jest przezroczyste dla ultrafioletu zastępuje się je czasem kwarcem).

Wnętrze bańki fotokomórki gazowanej wypełnione jest gazem szlachetnym, najczęściej argonem pod ciśnieniem rzędu 0,1 - 1 Tr. W fotokomórkach gazowanych przy przelocie elektronów między katodą a anodą następuje jonizacja gazu. Jony dodatnie powstające w procesie jonizacji bombardują katodę wyzwalając dodatkowe elektrony. Zachodzi zjawisko tzw. wtórnej emisji elektronów. Na elektrody fotokomórki gazowanej nie można przyłożyć zbyt dużego napięcia przekraczającego wartości wywołującej samoistne wyładowanie jarzeniowe w lampie. Grozi to zniszczeniem fotoczułej warstwy w katodzie. Fotokomórki gazowane są bardziej czułe niż fotokomórki próżniowe, za to mają dużą bezwładność wywołaną małą ruchliwością ciężkich jonów dodatnich. Przykładając stałą różnicę potencjałów między katodą i anodą i zamykając obwód po naświetleniu fotokatody obserwujemy przepływ fotoprądu, którego natężenie zależy od natężenia padającego promieniowania. Zależność natężenia fotoprądu od przyłożonego napięcia daje nam charakterystykę prądowo-napięciową fotokomórki. Charakterystykę  $I=f(U)$  zdejmujemy w obwodzie, którego schemat przedstawia rysunek /6/.

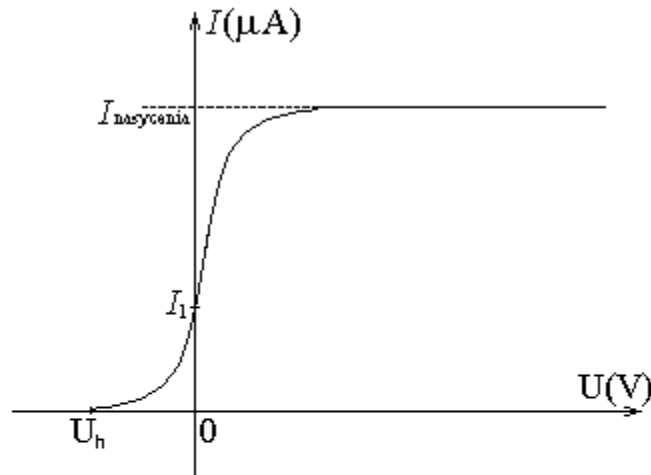


Rys.6.

W fotokomórce próżniowej po przyłożeniu wystarczająco dużego napięcia uzyskujemy tzw. prąd nasycenia. dzieje się to wtedy gdy ustala się równowaga między liczbą wybitych, a odprowadzanych do anody fotoelektronów. Ponieważ natężenie prądu zależy od liczby nośników nie ma możliwości podwyższenia go przy nie zmieniającej się ich liczbie. Zgodnie z

prawem Lenarda możemy zwiększyć liczbę nośników (elektronów) przez podwyższenie natężenia oświetlenia.

Wykres charakterystyki prądowo-napięciowej  $I=f(U)$  dla fotokomórki próżniowej przedstawia rysunek /7/.



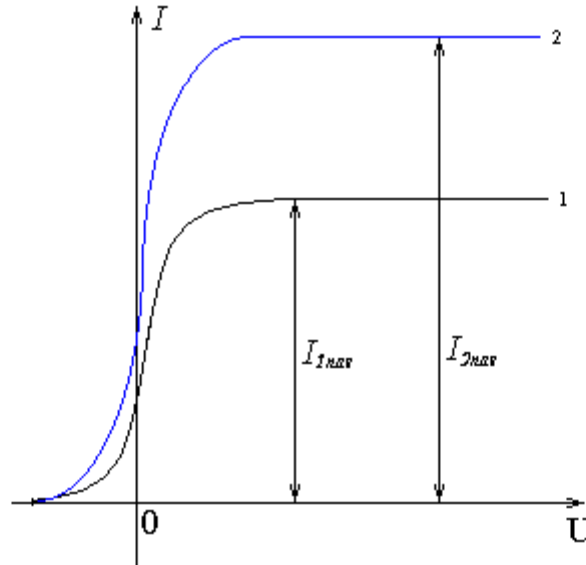
Rys.7.

$I_1$  jest natężeniem prądu pochodzącym od samoistnego przepływu elektronów między katodą i anodą w wyniku fotoemisji (elektrony wybijane przez fotony poruszają się z pewną prędkością i mogą dotrzeć do anody bez zewnętrznego pola elektrycznego).  $U_h$  -to napięcie hamowania. Ponieważ elektrony zgodnie z prawem Einsteina /8/ mają określoną energię kinetyczną /7/, aby je wyhamować należy przyłożyć różnicę potencjałów  $U_h$  blokującą przepływ, wówczas

$$\frac{mV_{max}^2}{2} = eU_h. \quad /10/$$

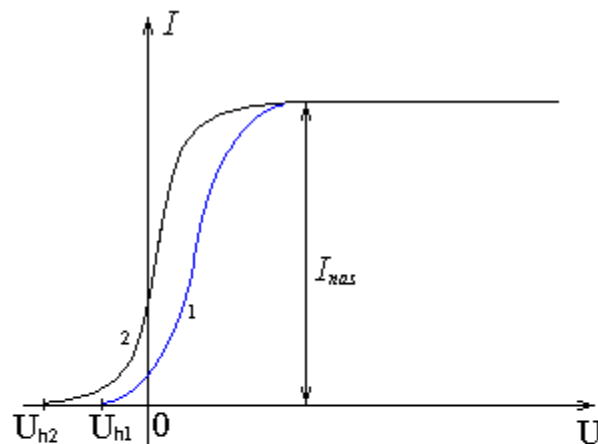
Znając wartość ładunku elementarnego  $e$  oraz mierząc napięcie hamowania możemy wyznaczyć maksymalną energię kinetyczną elektronów a pośrednio prędkość.

Zmiana wartości natężenia promieniowania wywołuje zmianę prądu nasycenia ( $I_{nas}$ ).



Rys.8.

Na rysunku /8/ przedstawiono dwie charakterystyki, gdzie  $I_{2mas} > I_{1nas}$ , ponieważ natężenie oświetlenia  $I_2 > I_1$  przy zachowanej częstotliwości  $\nu_1 = \nu_2$ . Z kolei dla  $I_1 = I_2$ ,  $I_{1nas} = I_{2mas}$  oraz dla  $\nu_1 < \nu_2$ ,  $U_{h1} < U_{h2}$  wykres przedstawiałby się tak jak to przedstawia rysunek /9/.

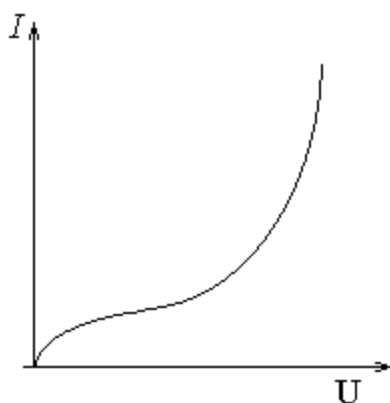


Rys.9.

W fotokomórkach próżniowych natężenie fotoprądu jest niewielkie i fotokomórki te często pracują w układzie ze wzmacniaczem.

W fotokomórkach gazowanych nie obserwujemy prądu nasycenia, ponieważ nie można wytworzyć sytuacji, w której nastąpi wyrównanie liczby nośników wytwarzanych i odprowadzanych do anody. Obecność gazu skutecznie hamuje elektrony wyrzucane z fotokatody bez obecności zewnętrznego pola elektrycznego i praktycznie charakterystyka zaczyna się od zera. Dla dużych napięć pojawiają się dodatkowe efekty z jonizacją i wybijaniem z katody dodatkowych elektronów przez jony dodatnie. Wartość fotoprądu gwałtownie rośnie. Przebieg charakterystyki dla fotokomórki gazowanej przedstawia rysunek /10/.

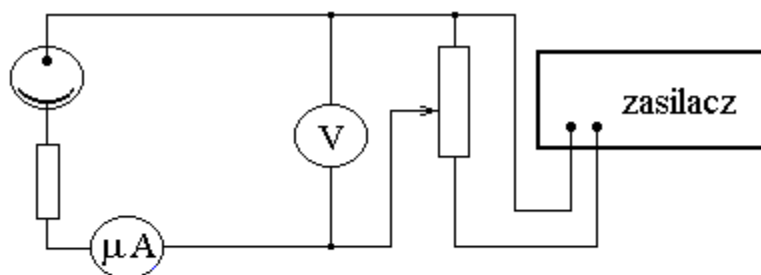




Rys.10

### III Badanie fotokomórki gazowanej

Do badania fotokomórki gazowanej używamy ławy optycznej z podziałką milimetrową. Na końcu ławy w specjalnej podstawie zamontowana jest fotokomórka w kołpaku. Wzdłuż ławy może przesuwać się lampa w osłonie. Do kompletu zestawu pomiarowego należy także stabilizowany zasilacz prądu stałego z regulacją, potencjometr, woltomierz, mikroamperomierz oraz filtry. Zestaw pomiarowy powinien być połączony zgodnie z poniższym schematem:



Rys.11.

#### A. Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej.

1. Zmontować zestaw według schematu (rys./11/).
2. Włączyć zasilanie zasilacza, odczekać około 5 minut.
3. Ustawić źródło światła w odległości wskazanej przez prowadzącego zajęcia.
4. Włączyć przełącznik napięcia na zasilaczu i potencjometrami wewnętrznym i zewnętrznym ustawić napięcie początkowe  $U = 0$ .

**Uwaga! Włączenia dokonać pod opieką prowadzącego zajęcia.**

5. Rozaretować mikroamperomierz i pokrętełm ustawić zakres wskazany przez prowadzącego zajęcia. Przekręcić kołpak fotokomórki i skierować na nią strumień światła.

6. Odczytywać wskazania woltomierza i mikroamperomierza zmieniając potencjometrem napięcie co 5 V

Uwaga! Nie należy przekraczać napięcia 75 V.

7. Pomiary z punktu 6 powtórzyć 3- krotnie.

8. Wyznaczyć średnie wartości natężenia dla tych samych wartości napięcia.

9. Czynności z punktów 3, 6, 7 i 8 powtórzyć dla 5-ciu różnych położeń lampy (podanych przez prowadzącego).

10. Na papierze milimetrowym w jednym układzie współrzędnych sporządzić wykresy charakterystyk.

11. Obliczyć błędy maksymalne posługując się klasą przyrządów elektrycznych oraz dokładnością podziałek liniowych.

12. Dla każdego punktu doświadczalnego zaznaczyć na wykresach maksymalny błąd pomiaru.

13. Przeprowadzić dyskusję wyników i błędów.

**Uwaga! Po zakończeniu pomiarów za zgodą prowadzącego:**

1. zaaretować mikroamperomierz ustawiając pokrętko w pozycji „aret”;

2. potencjometr zewnętrzny i wewnętrzny zasilacza ustawić w pozycji minimum;

3. przełącznik napięcia ustawić w pozycji 0;

4. wyłączyć zasilanie zasilacza, wyłączyć sieć.

## **B. Badanie zależności natężenia fotoprądu od oświetlenia.**

1. Zmontować zestaw według schematu (rys./11/).
2. Włączyć zasilanie zasilacza, odczekać około 5 minut.
3. Włączyć przełącznik napięcia na zasilaczu .

### **Uwaga! Włączenia dokonać pod opieką prowadzącego zajęcia.**

4. Rozaretować mikroamperomierz i pokrętłem ustawić zakres wskazany przez prowadzącego zajęcia. Przekręcić kołpak fotokomórki .
5. Potencjometrami wewnętrznym i zewnętrznym ustawić napięcie początkowe wskazane przez prowadzącego.
6. Ustawić źródło światła w maksymalnej odległości od fotokomórki a następnie przybliżać je co 5 cm.
7. Odczytywać wskazania woltomierza i mikroamperomierza dla każdego położenia źródła światła.
8. Pomiary z punktu 7 powtórzyć 3-krotnie dla tych samych położen źródeła światła.
9. Wyznaczyć średnie wartości natężenia fotoprądu dla tych samych położen źródeła światła.
10. Czynności z punktu 5, 6, 7, 8 i 9 powtórzyć dla 5-ciu różnych wartości napięcia zasilania.
11. Sporządzić wykresy zależności:  $I=f(r)$ ,  $I=f(r^2)$  i  $I=f(1/r^2)$  (na jednym arkuszu papieru milimetrowego winno znaleźć się tyle wykresów ile różnych napięć używano w pomiarach).
12. Oznaczyć błędy maksymalne posługując się klasą przyrządów elektrycznych oraz dokładnością podziałek liniowych. Odpowiednio oszacować błąd  $r^2$  i  $1/r^2$ .
13. Dla każdego punktu doświadczalnego zaznaczyć na wykresach maksymalny błąd pomiaru.
14. Przeprowadzić dyskusję wyników i błędów

### **Uwaga! Po zakończeniu pomiarów za zgodą prowadzącego:**

1. zaaretować mikroamperomierz ustawiając pokrętło w pozycji „aret”;
2. potencjometr zewnętrzny i wewnętrzny zasilacza ustawić w pozycji minimum;
3. przełącznik napięcia ustawić w pozycji 0;
4. wyłączyć napięcie, wyłączyć sieć.

### **C. Badanie zależności natężenia fotoprądu od częstotliwości promieniowania.**

1. Zmontować zestaw według schematu (rys./11/).
  2. Włączyć zasilanie zasilacza, odczekać około 5 minut.
  3. Włączyć przełącznik napięcia na zasilaczu .
- Uwaga! Włączenia dokonać pod opieką prowadzącego zajęcia.
4. Ustawić źródło światła w podanej przez prowadzącego odległości od fotokomórki.
  5. Rozaretować mikroamperomierz i pokrętełm ustawić zakres wskazany przez prowadzącego zajęcia. Przekręcić kołpak fotokomórki .
  6. Potencjometrami wewnętrznym i zewnętrznym ustawić napięcie wskazane przez prowadzącego.
  7. ustawić filtr przed okienkiem w kołpaku fotokomórki.
  8. Odczytać wartości napięcia i natężenia fotoprądu.
  9. Powtórzyć czynności z punktu 7 i 8 dla pozostałych filtrów ustawiając je wg. kolorów tęczy od czerwonego do fioletowego.
  10. Powtórzyć czynności z punktu 7, 8 i 9 trzykrotnie dla tych samych filtrów.
  11. Obliczyć średnie wartości natężenia dla tych samych filtrów, wartości napięcia i położenia źródła światła.
  12. Powtórzyć czynności z punktu 7, 8, 9, 10 i 11 dla 5-ciu różnych odległości i 5-ciu różnych wartości napięcia wskazanych przez prowadzącego.
  13. Sporządzić wykresy zależności  $I=f(kolor\ filtra)$  w postaci diagramów dla różnych odległości i wartości napięć.
  14. Przeprowadzić dyskusję wyników i błędów.

#### **Uwaga! Po zakończeniu pomiarów za zgodą prowadzącego:**

1. zaaretować mikroamperomierz ustawiając pokręteło w pozycji „aret”;
2. potencjometr zewnętrzny i wewnętrzny zasilacza ustawić w pozycji minimum;
3. przełącznik napięcia ustawić w pozycji 0;
4. wyłączyć napięcie, wyłączyć sieć.

#### **Literatura**

- |                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| 1. J. Orear                | - Fizyka t.2.                       |
| 2. B. Jaworski, A. Dietłaf | - Kurs fizyki t.3.                  |
| 3. S. Szczeniowski         | - Fizyka doświadczalna cz. V.1.     |
| 4. E. Dudziak              | - Fizyka t.2.                       |
| 5. T. Dryński              | - Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. |