



**ĆWICZENIE
91**

**BADANIE ZEWNĘTRZNEGO ZJAWISKA
FOTOELEKTRYCZNEGO**

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie charakterystyki prądowo–napięciowej $I(U)$ fotokomórki w zależności od wartości strumienia promieniowania padającego; wyznaczenie czerwonej granicy fotoefektu i pracy wyjścia elektronów z fotokatody; wyznaczenie stałej Plancka.

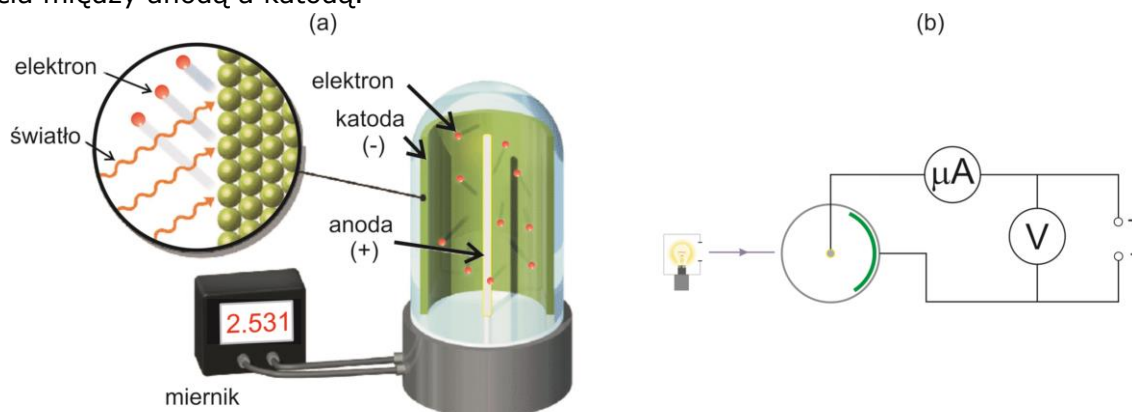
Zagadnienia: Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne, prawa rządzące fotoefektem, praca wyjścia elektronów.

1 Wprowadzenie

Zjawiskiem fotoelektrycznym określa się efekt elektryczny powstający w ciałach pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego (światła, promieniowania ultrafioletowego, rentgenowskiego). Do efektów tych należą:

- Emisja elektronów z powierzchni ciała do otaczającej je przestrzeni – mówi się wówczas o zjawisku fotoelektrycznym zewnętrznym. Zjawisko fotoelektryczne obserwowane w gazach, na oddzielnych atomach i cząsteczkach, przyjęto nazywać fotojonizacją, rezerwując określenie fotoefektu zewnętrznego albo fotoemisji dla zjawiska obserwowanego podczas oświetlania ciała stałego lub ciekłego.
- Wzrost przewodnictwa elektrycznego pod wpływem oświetlenia – mówi się wówczas o zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym lub fotoprzewodnictwie. Obserwuje się je w półprzewodnikach i dielektrykach.
- Powstawanie siły elektromotorycznej na złączu półprzewodnika i metalu, lub dwu półprzewodników różnych typów podczas absorpcji przez złącze kwantów promieniowania elektromagnetycznego (z zakresu widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni) – mówi się wówczas o zjawisku fotoelektrycznym zaporowym lub efekcie fotowoltaicznym.

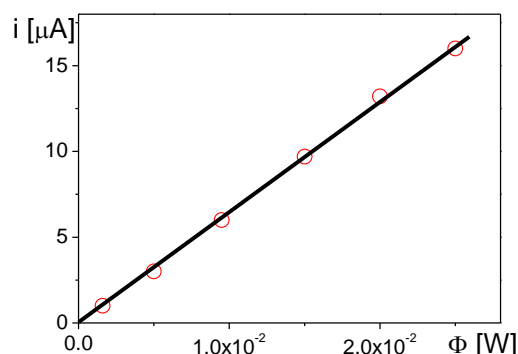
Do przedstawienia idei działania zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego można posłużyć się prostym schematem zawierającym komórkę fotoelektryczną próżniową, której schemat wraz z prostym układem pomiarowym przedstawiono na rys 1. Katoda fotokomórki wykonana jest z materiału emitującego elektrony pod wpływem promieniowania świetlnego (strumienia fotonów). Elektrony wybijane z fotokatody przez strumień światła są zbierane przez anodę. Natężenie prądu płynącego w obwodzie fotokomórki zależy od wartości natężenia promieniowania padającego na fotokatodę, od długości fali tego promieniowania oraz od napięcia między anodą a katodą.



Rys. 1. Schemat układu do badania zjawiska fotoelektrycznego.

Zależność natężenia fotoprądu od strumienia promieniowania padającego na katodę

Liczbę elektronów wybijanych z fotokatody w jednostce czasu można zwiększyć lub zmniejszyć wzmacniając lub osłabiając strumień Φ promieniowania padającego na fotokatodę. Przy stałym napięciu przyspieszającym zwiększenie strumienia promieniowania powoduje liniowy wzrost natężenia fotoprądu (Rys. 2). Proporcjonalność ta występuje nawet dla bardzo dużych wartości strumienia promieniowania. Po zmianie długości fali promieniowania świetlnego, bądź też po zmianie materiału katody zmienia się tylko nachylenie prostej przedstawionej na Rys. 2. Zastosowanie źródła światła niemonochromatycznego nie zmienia liniowego przebiegu wykresu, jeśli tylko zmiana strumienia promieniowania padającego na katodę nie jest związana ze zmianą rozkładu energii w widmie tego promieniowania.



Rys. 2. Zależność natężenia prądu fotoelektrycznego i od strumienia promieniowania Φ padającego na fotokatodę przy stałym napięciu przyspieszającym.

Zależność natężenia prądu fotoelektrycznego od napięcia przyspieszającego

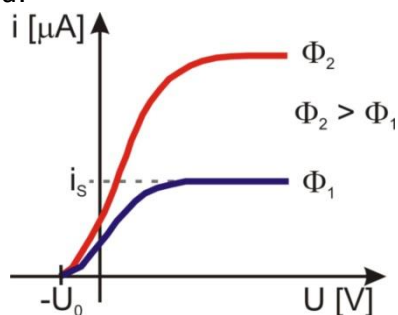
Przy określonym stałym strumieniu Φ promieniowania monochromatycznego z katody w jednostce czasu wybijana jest stała liczba elektronów. Przy niskim napięciu przyspieszającym nie wszystkie fotoelektrony, które opuściły katodę w jednostce czasu, zostaną w tym samym jednostkowym przedziale czasu odprowadzone do anody. W otoczeniu katody powstaje chmura elektronowa i ustala się stan równowagi dynamicznej, polegający na tym, że część elektronów, które opuściły katodę a nie zostały przechwycone przez anodę powraca do katody. Zwiększenie napięcia przyspieszającego powoduje szybki przyrost natężenia prądu, aż do osiągnięcia wartości zwanej prądem nasycenia i_s (Rys. 3). Odpowiada to sytuacji, gdy wszystkie fotoelektrony wyemitowane z katody są wychwytywane przez anodę. Zwiększanie napięcia przyspieszającego nie może już zwiększyć natężenia prądu.

Z wykresu przedstawionego na Rys. 3 widać, że prąd w obwodzie płynie nawet wtedy, gdy napięcia są ujemne (potencjał anody niższy niż potencjał katody). Oznacza to, że część elektronów ma energię kinetyczną wystarczającą na wykonanie pracy przeciwko siłom hamującego pola elektrycznego. Przy pewnej wartości napięcia hamującego U_0 nawet elektrony o największej energii nie osiągają anody i prąd w obwodzie przestaje płynąć. Tę wartość napięcia hamującego U_0 nazywamy napięciem odcięcia lub napięciem blokującym.

Znajomość wartości napięcia blokującego pozwala wyznaczyć maksymalną prędkość i energię kinetyczną fotoelektronów z zależności:

$$e U_0 = \frac{1}{2} m V_{max}^2 \quad (1)$$

w której e jest ładunkiem elektronu, m – jego masą, V_{max} – prędkością, jaką mają elektrony o maksymalnej energii kinetycznej. Wartość napięcia blokującego U_0 , a tym samym maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów, nie zależy od wartości strumienia



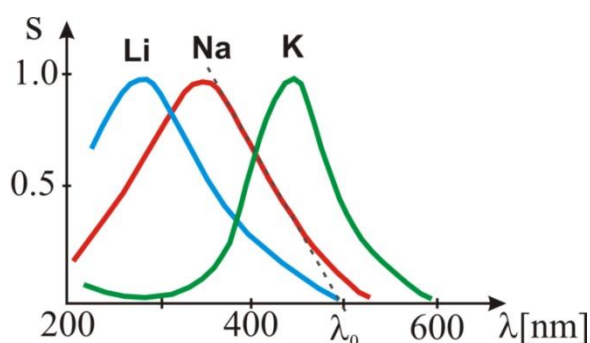
Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotokomórki próżniowej wykonane dla dwóch różnych wartości strumienia Φ i tej samej częstotliwości promieniowania

promieniowania padającego na fotokatodę, ale rośnie liniowo ze wzrostem częstotliwości ν padającego promieniowania. Przy pewnej charakterystycznej dla materiału fotokatody, tzw. progowej częstotliwości ν_0 promieniowania padającego na katodę, energia wyemitowanych elektronów spada do zera. Promieniowanie z zakresu widmowego, obejmującego częstotliwości niższe niż ν_0 , efektu fotoelektrycznego nie wywołuje.

Zależność natężenia prądu fotoelektrycznego od częstotliwości promieniowania

Przy zachowaniu stałej wartości strumienia promieniowania padającego na fotokatodę oraz napięcia gwarantującego uzyskanie prądu nasycenia, natężenie prądu fotoelektrycznego zmienia się na ogół znacznie przy zmianie częstotliwości promieniowania. Stosunek σ natężenia prądu fotoelektrycznego do strumienia promieniowania monochromatycznego padającego na fotokatodę, zwany czułością fotoelektryczną spektralną, jest wielkością, którą wprowadzono w celu ilościowego scharakteryzowania własności fotoemisyjnych różnych substancji. Na rys. 4 przedstawiono zależności czułości fotoelektrycznej σ od długości fali dla metali alkalicznych.

Charakterystyczny jest zanik fotoprądu, gdy długość fali światła padającego na katodę przekroczy pewną wartość graniczną λ_0 (odpowiadającą częstotliwości progowej ν_0), którą w związku z tym nazywa się długofalową lub "czerwoną" granicą fotoefektu. Dla większości metali długofalowa granica zjawiska fotoelektrycznego przypada na zakres ultrafioletu i bardzo silnie zależy od stanu powierzchni emitującej elektrony, a zwłaszcza od jej utlenienia, bądź też od warstw gazu adsorbowanych na powierzchni metalu.



Rys. 4. Zależność względnej czułości fotoelektrycznej S od długości fali –promieniowania dla wybranych metali alkalicznych.

Zjawisko fotoelektryczne według fotonowej teorii światła Einsteina

W celu wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego Einstein wykorzystał koncepcję Plancka, według której promieniowanie elektromagnetyczne jest emitowane w postaci kwantów o energii E proporcjonalnej do częstotliwości promieniowania ν ($E = h\nu$, gdzie h jest stałą Plancka). Einstein uczynił dalej idące założenie, przyjmując, że samo promieniowanie ma strukturę nieciągłą i jest nie tylko emitowane ale także pochłaniane i rozchodzi się w przestrzeni w postaci kwantów o energii $h\nu$, które według dzisiejszej terminologii nazywamy fotonami. Oddziaływanie światła z materią sprowadza się zatem do oddziaływania fotonów z cząstkami materii. Elementarnym i jednocześnie podstawowym aktem w zjawisku fotoelektrycznym jest absorpcja fotonu przez elektron, który uzyskuje wówczas całą energię fotonu $h\nu$.

Fotoelektron o nadmiarowej energii $h\nu$ znajdujący się na powierzchni metalu, może opuścić metal tracąc przy tym część energii W na wykonanie tzw. pracy wyjścia. Fotoelektron znajdujący się początkowo w głębi metalu traci zwykle podczas wędrówki ku powierzchni część swej energii zderzając się z innymi elektronami. Maksymalna energia kinetyczna, z jaką fotoelektron może opuścić powierzchnię metalu, została opisana przez Einsteina równaniem

$$E_{k_{max}} = h\nu - W \quad (2)$$

Z powyższego równania można wywnioskować, że jeżeli energia padającego fotonu jest mniejsza niż praca wyjścia ($h\nu < W$), to zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi. Częstotliwość progową (czy progową długość fali λ_0), poniżej której emisja fotoelektronów nie może wystąpić, otrzymujemy z równania

$$h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = W \quad (3)$$

Po uwzględnieniu związku między maksymalną energią kinetyczną fotoelektronów a ich potencjałem blokującym U_0 otrzymujemy zależność

$$eU_0 = E_{k_{max}} = h\nu - W \quad (4)$$

która po obustronnym podzieleniu przez e sprowadza się do równania

$$U_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e} \quad (5)$$

Z powyższych dwóch równań wynika, że E_{max} oraz U_0 nie zależą od strumienia promieniowania wywołującego fotoefekt, lecz zależą od częstotliwości promieniowania i od pracy wyjścia W .

W podobny, sposób można wyjaśnić proporcjonalną zależność prądu nasycenia i_s od wartości strumienia promieniowania padającego na fotokatodę. Liczba elektronów n_e emitowanych w ciągu jednostki czasu jest wprost proporcjonalna do liczby fotonów n_f padających w tym samym czasie na powierzchnię fotokatody

$$n_e = \eta \cdot n_f \quad (6)$$

Występujący w powyższym równaniu współczynnik proporcjonalności η nazywa się wydajnością kwantową fotoefektu.

Strumień promieniowania w interpretacji Einsteina jest strumieniem fotonów, z których każdy niesie energię $h\nu$. Strumień energii promieniowania można więc wyrazić wzorem

$$\phi = n_f h\nu \quad (7)$$

Z dwu ostatnich równań wynika

$$i_s = n_e = \frac{\eta}{h\nu} \phi \quad (8)$$

Tak więc liczba fotoelektronów opuszczających katodę w jednostce czasu (natężenie prądu nasycenia) jest wprost proporcjonalna do wartości strumienia promieniowania padającego na fotokatodę.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Wyznaczanie czerwonej granicy fotoefektu oraz pracy wyjścia fotoelektronu

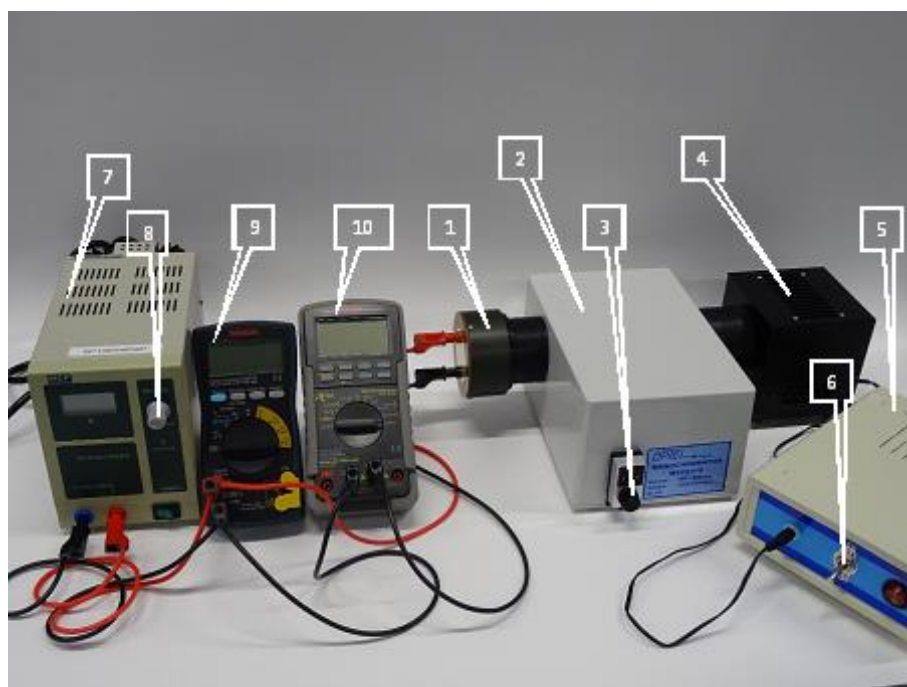
Wykaz przyrządów

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Monochromator | 5. Zasilacz stabilizowany oświetlacza |
| 2. Oświetlacz | 6. Zasilacz fotokomórki |
| 3. Woltomierz napięcia stałego | |
| 4. Amperomierz prądu stałego | |

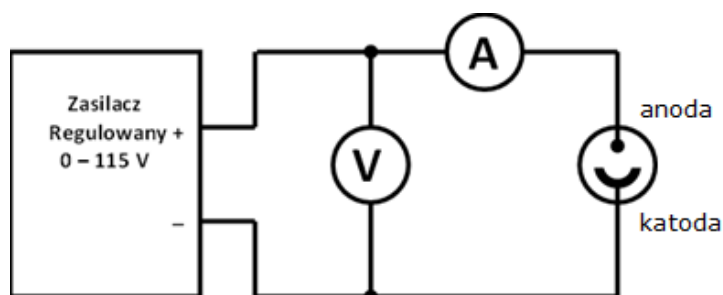
Schemat układu pomiarowego

Na rys. 1 przedstawiono stanowisko do pomiaru charakterystyk spektralnych fotoprądu oraz charakterystyk prądowo-napięciowych fotokomórki. Fotokomórka (1) umieszczona jest naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora (2). Na wyjściu fotokomórki (1) znajdują się dwa gniazda: czerwone i czarne. Czerwone jest połączone z anodą a czarne z katodą fotokomórki. Wybór długości fali na wyjściu monochromatora (z dokładnością do 5nm) umożliwia pokrętko (3), nad którym umieszczona jest skala wskazująca długość fali w nm. Naprzeciw szczeliny wejściowej monochromatora zamontowany jest oświetlacz (4). Na płycie czołowej zasilacza oświetlacza (5) znajduje się przełącznik umożliwiający wybór dwóch różnych mocy wyjściowych (6). Pozycja przełącznika w górnym położeniu odpowiada większej mocy wyjściowej a więc większemu natężeniu oświetlenia. Położenie dolne odpowiada mniejszemu

natężeniu oświetlenia. Zasilacz (7) służy do polaryzacji fotokomórki. Regulację napięcia wyjściowego umożliwi potencjometr (8). Na rys. 2 przedstawiono schemat układu do polaryzacji fotokomórki. W skład tego układu wchodzi oprócz zasilacza (7) - woltomierz (9) i amperomierz (10).



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego.



Rys. 6. Schemat zastępczy układu do polaryzacji fotokomórki.

3 Zadania do wykonania

3.1. Pomiary charakterystyki spektralnej fotoprądu fotokomórki

- 1) Zmontować układ pomiarowy wg schematu przedstawionego na rys. 1 i 2. W tym celu wyjście \oplus zasilacza (7) (czerwone gniazdo w zasilaczu) należy połączyć z anodą fotokomórki (czerwone gniazdo w fotokomórce) poprzez amperomierz, zaś wyjście \ominus (niebieskie gniazdo w zasilaczu) należy połączyć z katodą fotokomórki (czarne gniazdo). Woltomierz można włączyć równolegle do wyjścia zasilacza fotokomórki, pamiętając aby \ominus zasilacza odpowiadał wejściu COM w woltomierzu.
- 2) Zakres woltomierza ustawić na pomiar napięcia stałego (V)
- 3) Zakres amperomierza ustawić na pomiar prądu stałego (μA)
- 4) Włączyć zasilacz (7) do sieci.

- 5) Przy pomocy potencjometru (8) ustawić na zasilaczu (7) maksymalne napięcie wyjściowe (ok. 115V).
- 6) Odczytać i zanotować wartość tzw. prądu ciemnego, i_t , który powstaje w fotokomórce pod wpływem elektronów wzbudzonych termicznie i światłem rozproszonym.
- 7) Włączyć zasilacz oświetlacza (5) do sieci. Przełącznik (6) ustawić w górnym położeniu.
- 8) Zmierzyć charakterystykę spektralną fotoprądu fotokomórki w zakresie od 370nm do 700nm co 5nm. W tym celu dla każdej wartości długości fali wybranej za pomocą pokrętła (3) odczytać i zanotować wartość fotoprądu (odczyt z miernika (10)).
- 9) Po wykonaniu pomiaru skrócić potencjometr (8) w lewe skrajne położenie i wyłączyć zasilacze (5) i (7) z sieci.

3.2. Pomiary charakterystyki prądowo-napięciowej

- 1) Powtórzyć punkty 3.1. 1)-3).
- 2) Włączyć zasilacz oświetlacza (5). Ustawić przełącznik (6) w zasilaczu w górnym położeniu.
- 3) Korzystając z wyników otrzymanych w p. 3.1. znaleźć długość fali odpowiadającą maksymalnej wartości fotoprądu i ustawić tę wartość przy pomocy pokrętła (3).
- 4) Włączyć zasilacz (7) do sieci.
- 5) Zmierzyć charakterystykę prądowo – napięciową fotokomórki. W tym celu należy zmieniać napięcie polaryzujące fotokomórkę przy pomocy potencjometru (8) od 0 do ok. 115V. Dla każdej wartości napięcia, odczytać wartość fotoprądu. Po wykonaniu pomiaru skrócić potencjometr (8) w lewe skrajne położenie.
- 6) Powtórzyć pomiar charakterystyki I-V (punkty 3.2. 1) – 5)) przy mniejszym natężeniu oświetlenia fotokomórki, tj. przy dolnym położeniu przełącznika (6).

4. Opracowanie wyników

4.1. Wyznaczenie charakterystyki spektralnej

- 1) Sporządzić wykres charakterystyki spektralnej fotoprądu fotokomórki, tj. zależność $i=f(\lambda)$.
- 2) Dla kilku wybranych punktów narysować prostokąt niepewności przyjmując za niepewność i niepewność amperomierza $\Delta_p i$ oraz niepewność długości fali $\Delta_p \lambda = 2\text{nm}$.
- 3) Z wykresu odczytać czerwoną granicę λ_0 efektu fotoelektrycznego, aproksymując długofalową krawędź spektralnej charakterystyki fotokomórki do poziomu tła (patrz rys. 4 wstępu teoretycznego).
- 4) Obliczyć pracę wyjścia materiału, W , z którego wykonano fotokatodę. Porównując tę wartość z danymi materiałowymi, zidentyfikować materiał fotokatody.
- 5) Dla długości fali, wskazanej przez prowadzącego zajęcia, obliczyć maksymalną energię kinetyczną E_{kmax} fotoelektronów wybijanych z katody.
- 6) Obliczyć niepewności $\Delta \lambda_0$, ΔW i ΔE_{kmax} .

4.2. Wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej fotokomórki.

- 1) Sporządzić wykresy charakterystyki I-V fotokomórki dla dwóch różnych natężeń oświetlenia.
- 2) Z otrzymanych wykresów odczytać wartość fotoprądu nasycenia fotokomórki. Przyjmując, że wartość ta równa jest wartości fotoprądu przy maksymalnym napięciu polaryzacji (ok. 115V).
- 3) Zauważyć, jak natężenie oświetlenia fotokomórki wpływa na przebieg charakterystyki I-V i na wartość prądu nasycenia i_s fotokomórki.

Szczegółowa instrukcja wykonania ćwiczenia oraz opracowania wyników została przedstawiona w instrukcji wykonawczej ćwiczenia.

4 Pytania:

1. Wyjaśnić na czym polega zjawisko fotoelektryczne.
2. Wyjaśnić zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne na podstawie fotonowej teorii światła.
3. Omówić prosty układ do badania zjawiska fotoelektrycznego.
4. Od jakich wielkości zależy natężenie prądu fotoelektrycznego?
5. Zdefiniować pojęcia czerwonej granicy fotoefektu oraz pracy wyjścia elektronu z metalu.
6. Omówić charakterystyki prądowo – napięciowe fotokomórki. Wskazać napięcie blokujące i prąd nasycenia.

opracował A.Sieradzki