

E105. Badanie elementów optoelektronicznych

Cel: zapoznanie się z podstawowymi właściwościami trzech elementów optoelektronicznych: fotoopornika, fotodiody i fototranzystora.

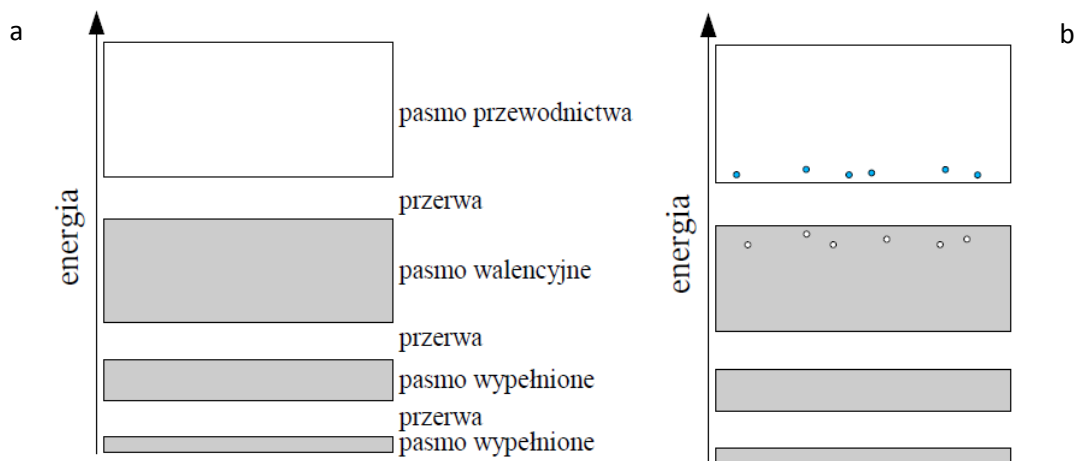
Zagadnienia: Zjawisko fotoelektryczne, półprzewodniki, czas relaksacji kondensatora.

Narzędzia: układ do montażu prostych układów elektrycznych, cyfrowy oscyloskop PicoScope, generator sygnału, zasilacz +5V (moduł NI USB 6009).

1. Wprowadzenie.

W wielu dziedzinach techniki zachodzi potrzeba rejestracji, wykrywania i pomiaru natężenia promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach fal, w tym i promieniowania widzialnego. Stosuje się wtedy czujniki promieniowania. Czujniki przystosowane do pracy w zakresie widzialnym widma nazywają się fotoelementami. Fotoelementy, zwane również elementami optoelektronicznymi mogą być lampowe i półprzewodnikowe. W fotoelementach lampowych (fotokomórka, fotopowielacz) wykorzystuje się zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, natomiast w półprzewodnikowych – wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne. Przedmiotem badań tego ćwiczenia są fotoelementy półprzewodnikowe, dlatego tytułem wstępu poniżej przypomniano najważniejsze informacje o półprzewodnikach.

Półprzewodniki, podobnie jak izolatory, mają całkowicie wypełnione pasmo walencyjne, a puste pasmo przewodnictwa (Rys. 1a). Przerwa energetyczna dzieląca oba te pasma jest jednak zdecydowanie mniejsza niż w przypadku izolatorów.

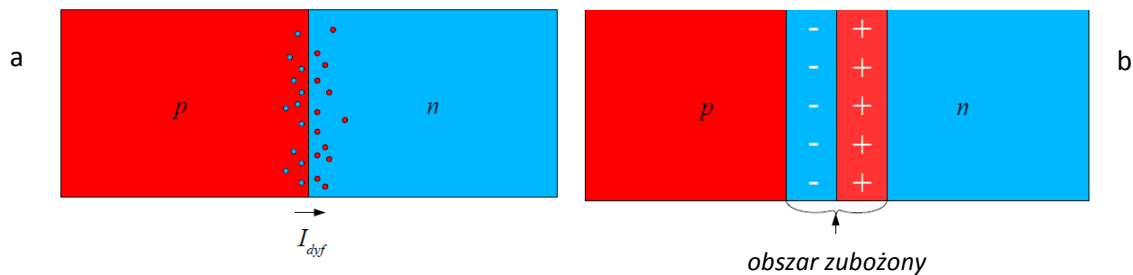


Rysunek 1. (a) Uproszczony schemat pasm energetycznych półprzewodnika. Kolor szary oznacza wypełnienie elektronami wszystkich stanów danego pasma. (b) szkicowo zobrazowane przejście elektronów do pasma przewodnictwa na skutek drgań cieplnych i w efekcie utworzenie dziur w paśmie walencyjnym.

W efekcie możliwe jest przejście elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa tylko na skutek drgań cieplnych tzn. przekazania danemu elektronowi energii kinetycznej poprzez „zderzenie” z innymi elektronami. W paśmie walencyjnym pojawiają się „dziury” - nośniki ładunku dodatniego. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie liczba nośników ładunku (elektronów w paśmie przewodnictwa i dziur w paśmie walencyjnym). Jeżeli np. w sieć krystaliczną cztero-wartościowego krzemu (Si^{IV}) wstawimy zamiast jego atomów, w niektórych miejscach atomy pięcio-wartościowego fosforu (P^{V}), wówczas fosfor dostarczy dodatkowego jednego elektronu walencyjnego nie uczestniczącego w tworzeniu wiązań sieci krystalicznej. Ten elektron będzie miał energię nieznacznie niższą od minimum pasma walencyjnego takiego domieszkowanego półprzewodnika i w efekcie bardzo łatwo będzie przechodził do tego pasma na skutek drgań cieplnych. Półprzewodnik tego typu nosi nazwę domieszkowanego donorowo, typu n (ang. *negative*). Jeżeli z kolei w tej samej sieci Si, zamienimy niektóre atomy krzemu atomami trój-wartościowego glinu (Al^{III} , aluminium), wówczas będzie się ona wykazywała niedoborem ładunków ujemnych czyli nadmiarem dziur. Taki półprzewodnik określamy domieszkowanym akceptorowo typu p (ang. *positive*). Silnie domieszkowany akceptorowo półprzewodnik określamy mianem typu p^+ . Silnie domieszkowany donorowo to półprzewodnik typu n^+ .

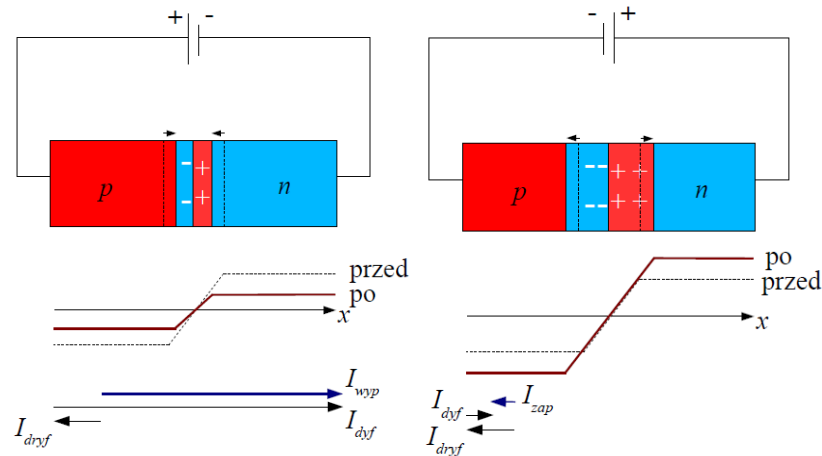
Interesujące jest połączenie dwóch półprzewodników różnych typów tworzące tzw. złącze. Tuż po ich zetknięciu elektrony z obszaru n , a dziury z obszaru p zaczynają przenikać płaszczyznę złącza i przechodzić do sąsiedniego obszaru. Ruch tych ładunków nazywamy prądem dyfuzji. W obszarze n , w pobliżu styku złącza, pozostaną zatem nieruchome jony

dodatnie nie ekranowane (nie równoważone) przez nieobecne elektrony, a w obszarze p pozostaną analogiczne jony ujemne. Powstaje tzw. obszar (warstwa) zubożony (Rys. 2).



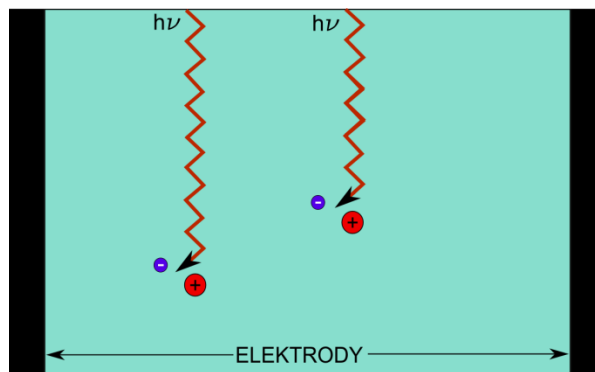
Rysunek 2. (a) Spontaniczny prąd dyfuzji na złączu półprzewodnikowym typu $p-n$. (b) warstwa zubożona na styku złącza.

Powstanie nieruchomego ładunku przestrzennego w obszarze zubożonym odpowiada za pojawienie się różnicy potencjałów U_0 między obszarem n i p . Pojawienie się różnicy potencjałów U_0 powoduje, że po pewnym czasie elektrony z obszaru n nie mogą już przedostać się do obszaru p , bo są one z niego wypychane przez niski potencjał. Z kolei dodatnie dziury nie mogą się po pewnym czasie przedostać do obszaru p gdyż są odpychane przez wysoki potencjał. Nastaje równowaga. W obszarze n występują mniej liczne (mniejszościowe) dziury, a w obszarze p elektrony. Choć jest ich mało to różnica potencjału wypycha je ze swoich obszarów odpowiednio do obszarów p i n . Występuje dodatkowy prąd unoszenia, I_{dryf} , skierowany przeciwnie do I_{dyf} . W izolowanym złączu $p-n$ panuje równowaga, a średni prąd dyfuzyjny jest równy średniemu prądowi unoszenia (tak że wypadkowy jest zerowy). Podłączenie źródła napięcia do złącza $p-n$ modyfikuje szerokość obszaru zubożonego. Mówimy, że złącze jest polaryzowane na przewodzenie (Rys. 3a) lub zaporowo (Rys. 3b). Zmienia się różnica potencjałów na złączu, a co za tym idzie rośnie prąd płynący przez złącze lub jego przepływ zostaje uniemożliwiony.



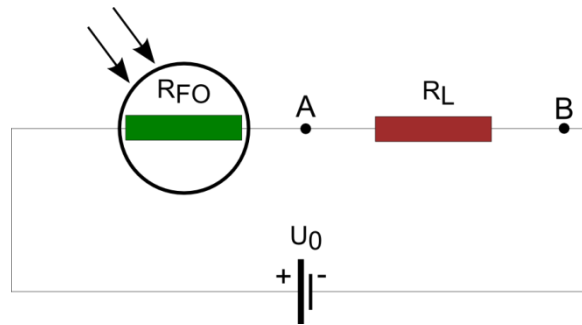
Rysunek 3. (a) Polaryzacja złącza p - n na przewodzenie. Spadająca różnica potencjałów na złączu zwiększa prąd dyfuzji, a w efekcie wypadkowy prąd, I_{wyp} . (b) Polaryzacja zaporowa zwiększa różnicę potencjałów obniżając prąd dyfuzji, co skutkuje niewielkim prądem wypadkowym w kierunku prądu unoszenia, I_{zap} .

1.1. Fotoopornik to w najprostszym przypadku półprzewodnik z dołączonymi dwoma elektrodami. Pod wpływem oświetlenia zmienia się jego opór, gdyż każdy zaabsorbowany foton tworzy parę dziura+elektron. Elektron przechodzi do pasma przewodnictwa, a dziura pozostaje w paśmie walencyjnym półprzewodnika. Powstała para zwiększa konduktywność fotoopornika, czyli zmniejsza jego opór właściwy (rysunek 4).



Rysunek 4. Budowa i zasada działania fotoopornika.

Fotoopornik w układzie pomiarowym łączy się szeregowo z opornikiem o określonym stałym oporze elektrycznym, zgodnie z rysunkiem 5.



Rysunek 5. Schemat łączenia fotoopornika R_{FO} ze stałym oporem R_L . Układ zasilany jest stałym napięciem U_0 . Spadek napięcia między punktami AB, na oporze stałym R_L , jest miarą oświetlenia fotoopornika R_{FO} .

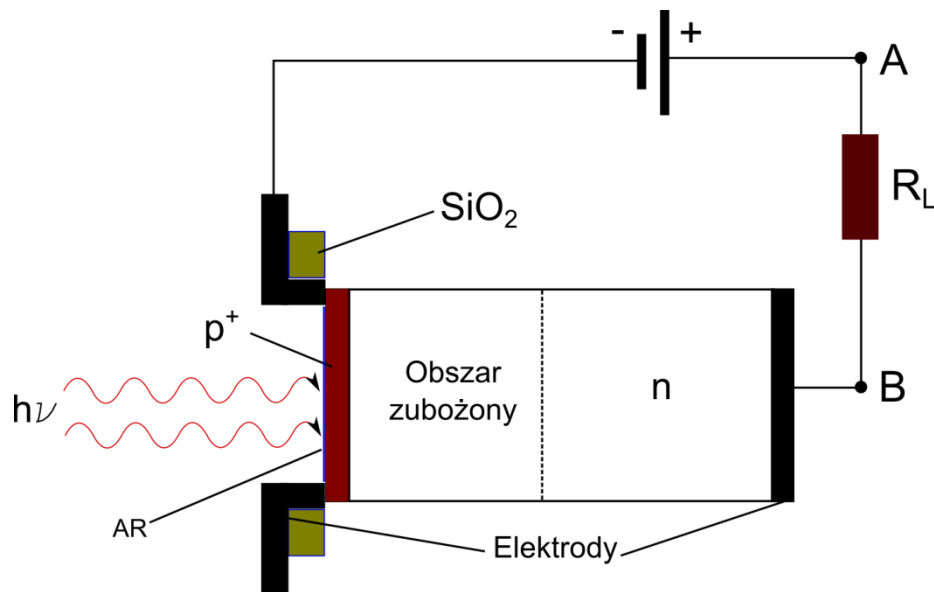
Zmiana oporności fotoopornika wywołana oświetleniem jego powierzchni czynnej A_{FO} światłem o strumieniu Φ_p [W] opisuje relacja [1]:

$$dR_{FO} = -R_{FO} \frac{q\lambda\eta_{wzb}\tau(\mu_n + \mu_p)}{\sigma hc A_{FO} W} \Phi_p \quad (1)$$

Powyżej q – ładunek elementarny, λ – długość fali światła, η_{wzb} – wydajność konwersji fotonu w parę dziura+elektron, τ - średni czas życia wolnego elektronu (zanim zrekombinuje), μ_n i μ_p – ruchliwość odpowiednio elektronów i dziur, σ - przewodność właściwa fotoopornika, h – stała Plancka, c – prędkość światła, W – grubość warstwy półprzewodnika. R_{FO} to opór fotoopornika w ciemności. Wyrażenie [1] zostało podane wyłącznie w celach poglądowych. Najważniejszy wniosek jaki z niego płynie to fakt, iż opór fotoopornika powinien zależeć liniowo od wielkość strumienia, jakim zostanie detektor oświetlony. Widać również, że zmiana oporności zależy od długości światła oświetlającego detektor. Stosując diody LED emitujące w różnych zakresach spektralnych możemy się spodziewać różnych odpowiedzi fotoopornika, dla tego samego Φ_p .

1.2. Fotodioda jest to dioda półprzewodnikowa o konstrukcji umożliwiającej oświetlenie obszaru złącza p - n . Jej budowę pokazano na rysunku 6, na którym zobrazowano jeden z możliwych typów fotodiod. Półprzewodnik typu p^+ (silnie domieszkowany akceptorowo) tworzy bardzo cienką warstwę, częściowo przepuszczalną dla światła. Pokryty jest warstwą antyrefleksyjną (AR) mającą obniżyć straty natężenia światła wywołane odbiciem od p^+ . Do p^+ podłączona jest elektroda izolowana od półprzewodnika typu n warstwą SiO_2 . Fotodioda zostaje spolaryzowana w kierunku zaporowym. Oznacza to, że w ciemności nie przepływa przez nią prąd. Silne domieszkowanie p^+ sprawia, że warstwa zubożona jest szeroka.

Jednocześnie mała grubość warstwy p^+ powoduje, że fotony są absorbowane w obszarze zubożonym, gdzie panuje silne pole elektryczne separujące powstałe na skutek absorpcji fotonu ładunki. Ładunki te się przemieszczają – elektrony w kierunku n , dziury w kierunku p^+ . Podczas gdy docierają one do obszarów neutralnych obu półprzewodników, z obszaru neutralnego n wydostaje się elektron, który podąża do bieguna „+” źródła zasilania, a biegun „-” dostarcza elektron, który rekombinuje z dziurą pojawiającą się w obszarze neutralnym p^+ . Powstaje fotoprąd I_F , którego przepływ rejestruje się na oporze R jako napięcie. Wartość fotoprądu rośnie ze wzrostem strumienia świetlnego Φ .



Rysunek 6. Budowa fotodiody i najprostszy sposób jej użycia. Pomiar napięcia wykonuje się między punktami A i B na obciążeniu R.

$$I_F = \eta_e \Phi / e \quad (2)$$

Powyżej η_e to zewnętrzna wydajność kwantowa fotodiody określająca jak efektywnie strumień światła jest zamieniany na fotoprąd. Nie należy mylić tej wielkości z wewnętrzną wydajnością kwantową, która mówi jak efektywnie zaabsorbowany foton jest zamieniany w parę dziura+elektron. Nie każda para musi prowadzić do przepływu fotoprądu, gdyż może ona zrekombinować przed opuszczeniem fotodiody. Warto wiedzieć, że η_e zależy od długości fali padającego światła, współczynnika absorpcji półprzewodników użytych w budowie fotodiody, ich grubości. Widać jednak, że I_F powinno zależeć liniowo od Φ .

Powstanie obszaru zubożonego w złączu p - n fotodiody (diody LED również) jest tożsamy z powstaniem obszarów o przeważających ładunkach odpowiednio dodatnich (w półprzewodniku typu n) i ujemnych (w półprzewodniku typu p) w okolicach złącza. Taka separacja ładunku odpowiada kondensatorowi o pojemności C_{oz} (oz – obszar zubożony). Obszary neutralne półprzewodników typu p i n wykazują pewną oporność R_s , którą możemy zobrazować jako podłączoną szeregowo do pojemności C_{oz} . Podłączenie do fotodiody obciążenia R_L (Rysunek 6) sprawia, że obwód taki odgrywa rolę układu typu RC, charakteryzującego się czasem relaksacji (rozładowania kondensatora) $\tau_C = RC = (R_s + R_L)C_{oz}$. R_s jest zazwyczaj małe w stosunku do R_L , zatem to R_L decyduje o τ_C . Zmieniając R_L możemy zatem modyfikować szybkość odpowiedzi fotodiody na oświetlenie.

Fototranzystor wykorzystuje własności złączy n - p - n lub p - n - p . Złącza zewnętrzne to emiter i kolektor (n, n lub p, p), a warstwa środkowa (p lub n) to baza. Fototranzystor polaryzujemy tak samo jak fotodiodę, stałym napięciem przy czym to kolektor jest polaryzowany dodatnio. W ciemności płynie mały prąd kolektor – emiter, którego natężenie pod wpływem oświetlenia bazy potrafi wzrosnąć kilkaset razy. Zatem płynący prąd jest sumą prądu ciemnego i indukowanego światłem. Mierzmy spadek napięcia na oporniku podłączonym szeregowo do spolaryzowanego tranzystora.

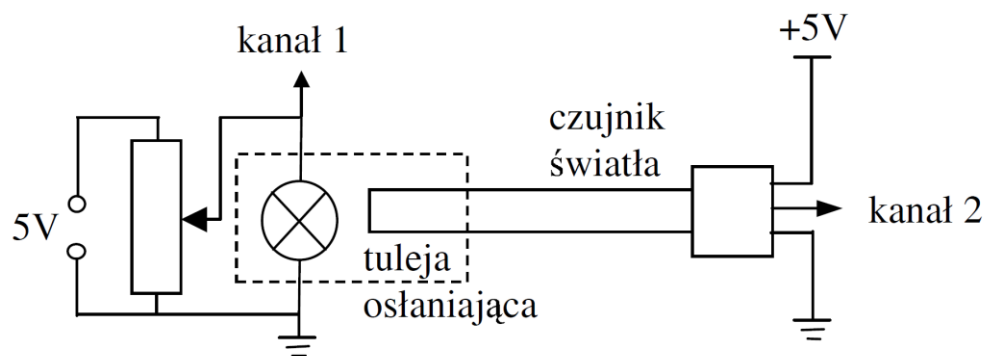
2. Cel ćwiczenia

Ćwiczenie składa się z dwóch części. W pierwszej – statycznej - wykonujący ma zbadać odpowiedź danego fotoelementu na oświetlenie światłem o danym natężeniu. W sytuacji najbardziej pożądanej detektor światła powinien wykazywać liniową zależność odpowiedzi, czyli np. oporu, od Φ . W praktyce nigdy tak nie jest. Dlatego przed jego użyciem w konkretnym układzie pomiarowym należy scharakteryzować jego odpowiedź na oświetlenie wyznaczając zależność np. jego oporu R od Φ . W drugiej części – dynamicznej – wykonujący ma zbadać szybkość odpowiedzi detektora na pojawienie się oświetlenia. Np. w telekomunikacji wykorzystującej modulację amplitudową światła, zwiększenie szybkości modulacji wymaga użycia detektora o odpowiednio szybkiej reakcji. Zatem podjęcie decyzji o użyciu danego fotoelementu powinno być poprzedzone określeniem jego dynamiki. Detektor doskonały powinien reagować natychmiast na pojawienie się oświetlenia i jego zanik. Nie istnieje taki detektor. Każdy cechuje pewna bezwładność i ona będzie przedmiotem badań drugiej części ćwiczenia.

3. Kalibracja źródła światła

Badanie fotoelementów wymaga użycia źródła światła je oświetlającego. W ćwiczeniu wykorzystane zostaną dwa źródła światła: klasyczna żarówka i dioda luminescencyjna LED. Ponieważ w ćwiczeniu ma zostać zbadana zależność odpowiedzi detektora na wielkość oświetlenia (wyrażonej przez strumień światła Φ), musimy mieć możliwość jego modyfikacji. Najprostszym rozwiązaniem tego zagadnienia jest zmiana ręczna lub automatyczna napięcia przyłożonego do źródła światła. Zrealizować to można za pomocą odpowiedniego układu elektrycznego zawierającego ręczny potencjometr, lub za pomocą elektrycznego generatora funkcji. Jednak sama zmiana napięcia nie wystarczy, gdyż koniecznym jest ustalenie jak ono wpływa na wielkość strumienia światła emitowanego przez jego źródło. Pomiar tej zależności określa się mianem kalibracji źródła światła, a można ją wykonać korzystając z wycechowanego detektora światła np. takiego, o którym wiemy, że jego odpowiedź jest wprost proporcjonalna do wielkości rejestrowanego przez niego strumienia światła.

Detektorem takim jest podłużna tuleja połączona z czarnym zasilaczem (Light sensor). Detektor ten pozwala na pracę w trzech zakresach oświetlenia i opisywanym ćwiczeniu należy wykorzystać zakres 600 luksów. By wykonać kalibrację wybranego źródła światła należy zmontować układ elektryczny przedstawiony na rysunku 7.



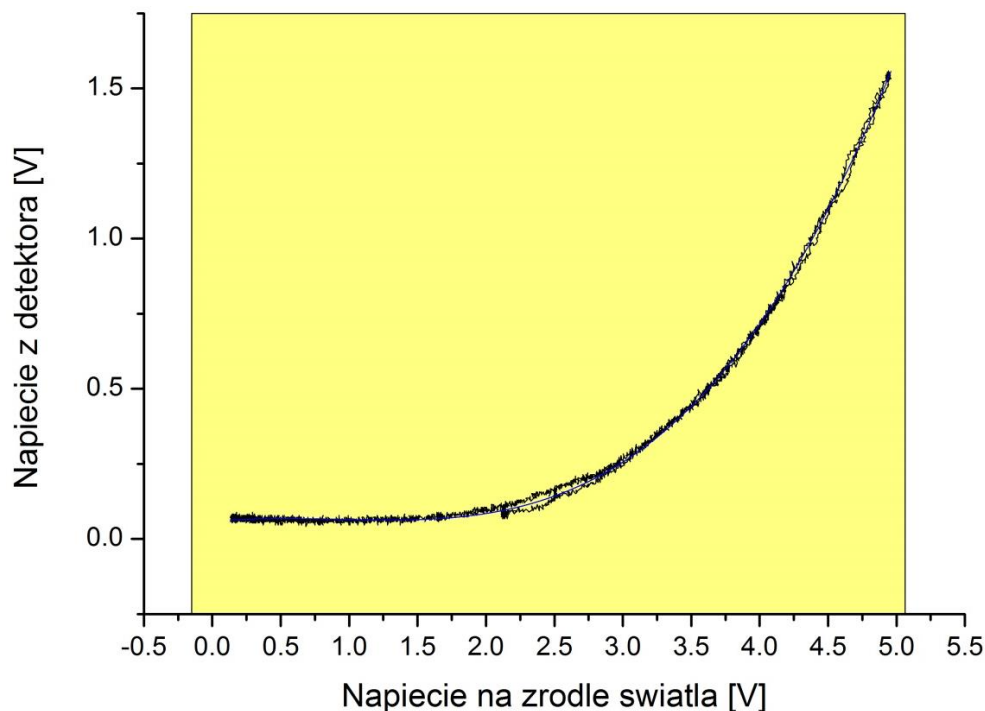
Rysunek 7. Schemat układu elektrycznego przeznaczonego do wykonania kalibracji źródła światła.

Zasilanie +5V można uzyskać z modułu NI USB 6009. Kanały 1 i 2 to punkty, w których dokonujemy pomiaru napięcia na źródle światła (Kanał 1) i odpowiedzi detektora (Kanał 2). Przewód czerwony zasilacza detektora to przewód +5V, przewód czarny to masa, a przewód żółty to przewód sygnałowy (Kanał 2). Schemat z rysunku 7 można zmodyfikować

włączając w niego, na miejscu potencjometru ze stałym zasilaniem +5V, sygnał z generatora funkcji. Należy wówczas pamiętać by częstotliwość zmian sygnału z generatora była mała (np. 1 Hz dla sinusoidy), gdyż wówczas efekty dynamiczne (o których mowa później) mogą zostać zaniedbane dla każdego z użytych źródeł światła.

Do pomiarów napięcia na kanałach 1 i 2 (Rysunek 7) należy użyć cyfrowego oscyloskopu Picoscope. By go użyć należy podłączyć go do komputera i po zainstalowaniu sterowników przez system (tzn. po chwili) uruchomić program Picoscope 6. Kanał 1 należy podłączyć do wejścia A oscyloskopu, a Kanał 2 do wejścia B. Wyzwalanie („układ wyzwalania”) oscyloskopu należy ustawić w pozycji „Żaden”, a rozdzielczość czasową i amplitudową obu kanałów należy dobrać tak by zarejestrować w jednym przebiegu oscyloskopu pełną zmianę napięcia na źródle światła dostępną w danej konfiguracji (ręcznej lub automatycznej).

Zarejestrowane poprawne przebiegi na obu kanałach A i B należy zapisać w pliku (np. tekstowym), a następnie zaimportować do programu Origin. Należy pamiętać by detektor i źródło światła osłonić dostępną tulejką, tak by najlepiej jak to możliwe osłonić oba od światła zewnętrznego, które może zniekształcić krzywą kalibracyjną. Rysunek 8 pokazuje taką krzywą dla jednego ze źródeł światła. Napięcie z detektora, w przypadku wycechowanego czujnika światła, jest wprost proporcjonalne do strumienia Φ . Poniższa zależność może być zatem interpretowana jako zależność $\Phi(U_{zr})$, gdzie U_{zr} to napięcie na źródle światła.



Rysunek 8. Wykres krzywej kalibracyjnej jednego ze źródeł światła (linia czarna) wraz z krzywą wielomianu III rzędu opisującego tę krzywą (linia niebieska).

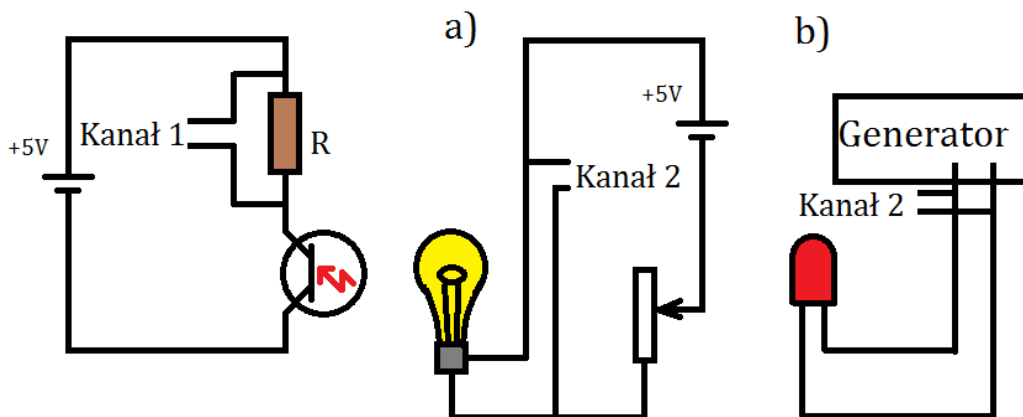
W programie Origin do krzywej eksperymentalnej należy dopasować np. wielomian III rzędu i zapisać jego współczynniki. W ten sposób w kolejnych krokach analizy wyników możliwa będzie zamiana dowolnej zależności $H(U_{\text{zr}})$ na $H(\Phi)$, gdzie H będzie odpowiedzią badanego detektora.

Zadania

a) przeprowadź kalibrację dostępnych źródeł światła.

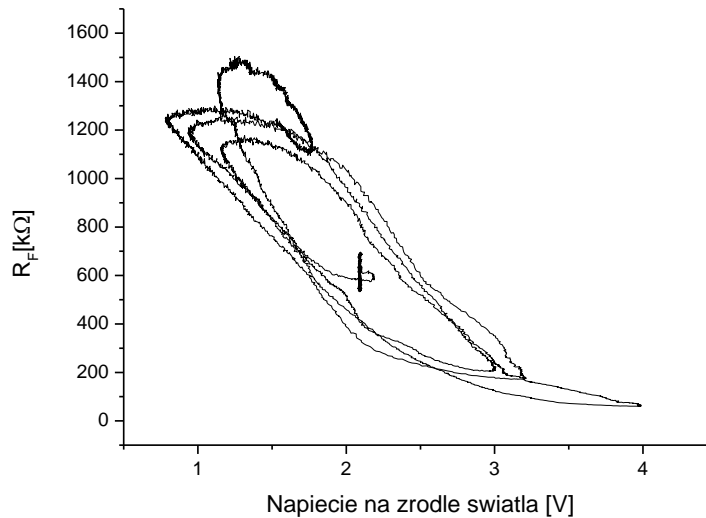
4. Pomiar zależności odpowiedzi detektora od wielkości oświetlenia (strumienia światła).

Montujemy układ przedstawiony na rysunku 9. Wersja przedstawiona na rysunku 9a zakłada użycie potencjometru i ręczną zmianę napięcia na źródle światła. Wersja przedstawiona na rysunku 9b zakłada użycie generatora funkcji np. sinusoidalnej jako źródła modulacji napięcia na źródle światła.



Rysunek 9. Schematy układów do pomiaru odpowiedzi na oświetlenie fotoelementów z użyciem (a) potencjometru i żarówki, (b) diody LED i generatora.

To co otrzymujemy może np. wyglądać jak zobrazowana na rysunku 10 zależność oporu fotoopornika od napięcia przyłożonego do jednego ze źródeł światła. Zależność ta musi zostać jeszcze zamieniona w zależność $R_F(\Phi)$, gdzie Φ można utożsamiać z napięciem mierzonym w procesie kalibrowania źródła światła na wycechowanym detektorze.



Rysunek 10. Przykładowa zależność oporu fotoopornika od napięcia przyłożonego do źródła światła.

Zadaniem studenta jest zbadanie trzech rodzajów detektorów: fotoopornika, fotodiody i fototranzystora zarówno przy użyciu potencjometru jak i generatora funkcji. Należy również użyć jako źródła światła żarówki oraz przynajmniej jednej z dostępnych diod LED. Należy podać propozycje wyjaśnienia obserwowanej zależności mierzonego sygnału od napięcia na źródle (np. przypominającej krzywą histerezy widoczną na rysunku 10) oraz podać proponowaną przyczynę, dla której są te krzywe takie same lub różne dla różnych konfiguracji źródło światła – detektor. Wreszcie dla każdego z detektorów należy określić jego charakterystykę. W przypadku fotoopornika jest to wspomniana zależność $R_F(\Phi)$. Dla fotodiody i fototranzystora jest to zależność natężenia fotoprądu od strumienia światła, $I_F(\Phi)$. Wartość I_F można wyliczyć z napięcia mierzonego na znanym obciążeniu (oporniku) podłączonym szeregowo do fotodiody (tak jak np. na rysunku 6). Pamiętaj, że fotodioda może pracować w trybie fotowoltaicznym. Wówczas pracuje ona jak fotoogniwo i nie wymaga zasilania (polaryzacji). By zbadać jej działanie wystarczy mierzyć napięcie na jej elektrodach.

Zadania

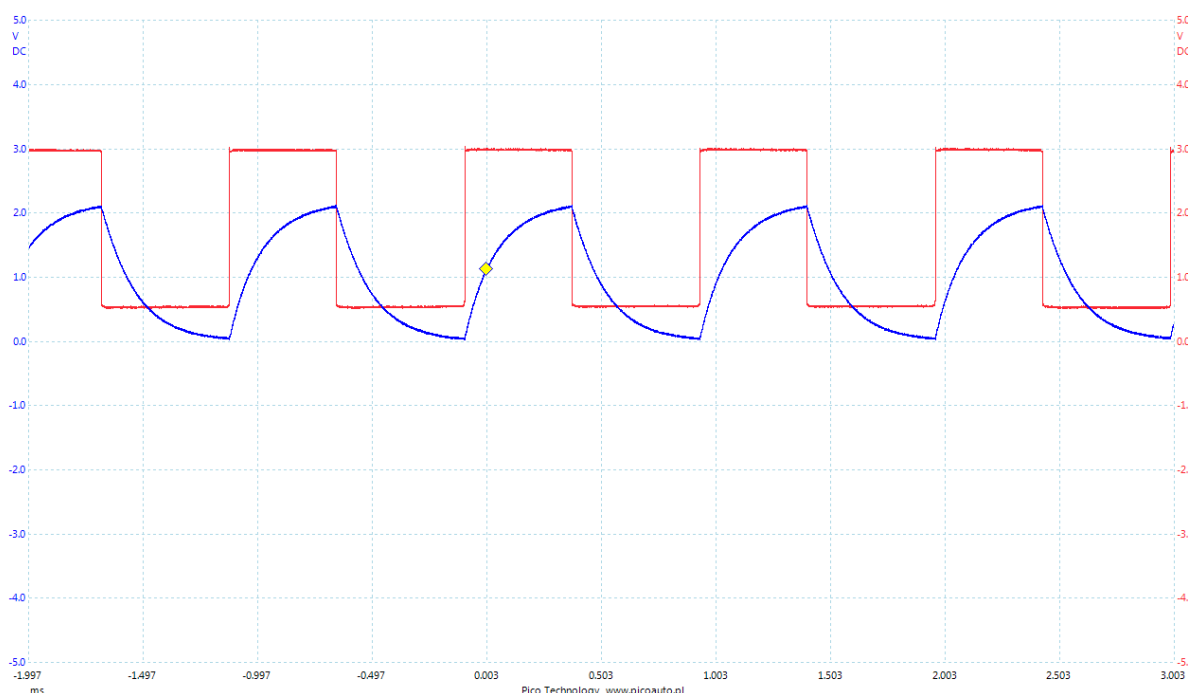
- zmierz zależność oporu fotoopornika od strumienia światła pochodzącego od jego źródła,
- zmierz zależność fotoprądu fotodiody od strumienia światła pochodzącego od jego źródła przy polaryzacji zaporowej fotodiody,
- zmierz zależność fotoprądu fototranzystora od strumienia światła pochodzącego od jego źródła,
- zmierz zależność fotoprądu fotodiody od strumienia światła pochodzącego od jego źródła dla fotodiody działającej w trybie fotowoltaicznym,
- wykonaj kalibrację i pomiar oporu fotoopornika od strumienia światła pochodzącego od

jego źródła dla dwóch różnych diod LED, emitujących światło o różnych długościach fali – wyjaśnij ewentualnie obserwowane różnice.

f) wykonaj kalibrację dla diody LED zasilanej z generator i fotodiody lub fototranzystora dla różnych częstotliwości generowanego sygnału. Wyjaśnij ewentualne różnice w krzywych kalibracyjnych tej samej pary dioda+fotoelement.

5. Badanie szybkości odpowiedzi fotodetektora

By zbadać szybkość działania fotodetektorów należy użyć układu z rysunku 9b. Żarówka wykazuje bardzo dużą bezwładność związaną z procesem rozgrzewania i schładzania drutu żarowego. Dlatego nie można jej użyć w tej części doświadczenia. Konieczne jest użycie diody LED jako źródła światła. Student powinien przeprowadzić wymienione niżej pomiary i wskazać przyczyny, dla których obserwowane sygnały mają swój przebieg, np. taki jaki zobrazowano na rysunku 11. W każdym przypadku należy odpowiednio dobierać częstość generowanej funkcji np. prostokątnej, oraz parametry oscyloskopu tj. zakres mierzonego napięcia, przedział czasowy pomiaru i częstość próbkowania – wyrażoną w próbkach/s (S/s)



Rysunek 11. Przykładowy przebieg sygnału przyłożonego do diody LED (czerwony) i mierzonego na obciążeniu R_L obwodu z fotodiody spolaryzowaną w kierunku zaporowym (niebieski).

Częstotliwość sygnału przykładanego do diody LED musi być odpowiednio duża, tak by osiągnąć zakres, w którym fotodiody przestać odpowiadać liniowo na oświetlenie. Należy

pamiętać, że samo źródło również nie musi już odpowiadać liniowo.

Zadania

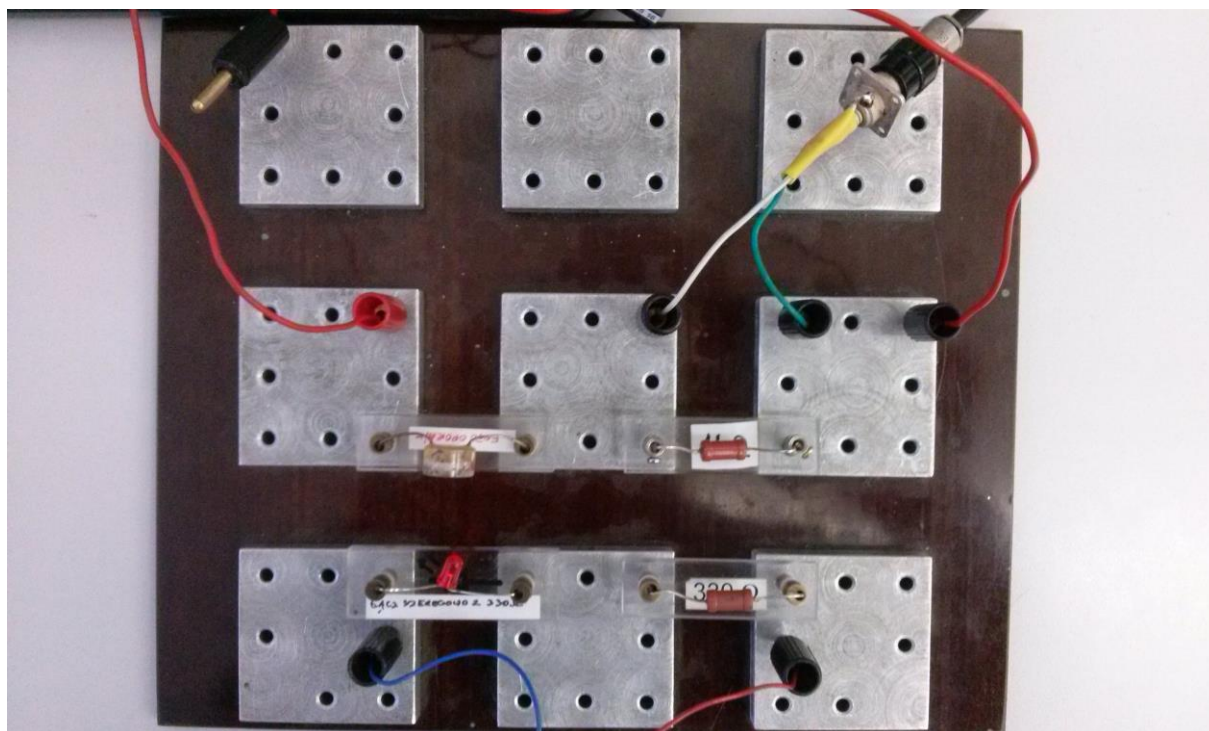
- a) zbadaj szybkość odpowiedzi fotoopornika,
- b) zbadaj szybkość odpowiedzi fotodiody dla danego oporu R_L ,
- c) zmień opór R_L w obwodzie z fotodiodą – zinterpretuj obserwowaną zmianę, jeśli taką zauważysz,
- d) zbadaj szybkość odpowiedzi fototranzystora.

6. Badanie charakterystyki prądowo napięciowej przy danym oświetleniu – zadanie dodatkowe.

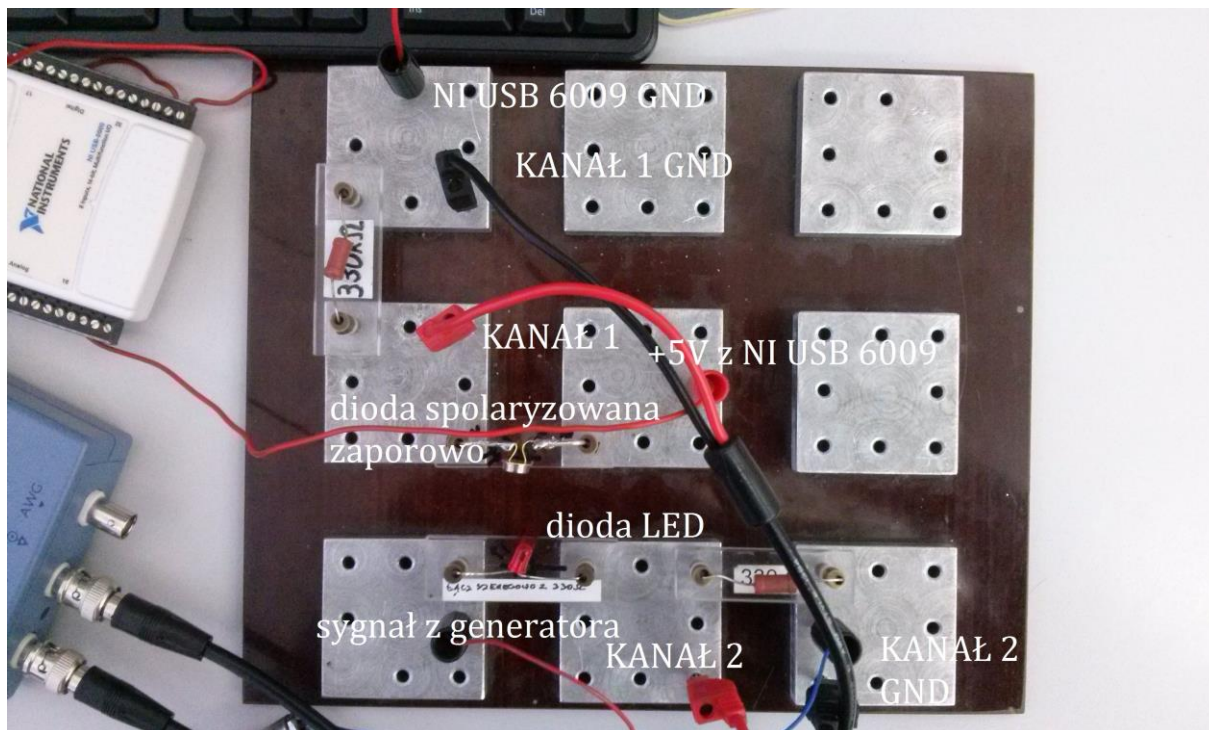
Znając zależność intensywności emisji źródła od przyłożonego do niego napięcia możemy zwiększać strumień oświetlenia w sposób narastający np. Φ , 2Φ , 3Φ , 4Φ itd... Dla tak zmienianego strumienia wyznacza się zależność prądu płynącego przez fotodiodę/fototranzystor od napięcia polaryzującego fotoelement. Pomiar ten wymaga użycia oscyloskopu Picoscope do pomiaru sygnału na fotodiodzie i napięcia ją polaryzującego, i dodatkowo karty NI USB-6009 do pomiaru napięcia na źródle światła. To ostatecznie można zrealizować korzystając z kanału AI0 karty USB oraz oprogramowania NI-MAX (a w nim Devices and Interfaces → NI USB-6009 „Dev...” → Test Panels → Analog Input → Start).

7. Zdjęcia pomocnicze.

Układ dioda LED, fotoopornik, generator



Układ dioda LED, fotodioda/fototranzystor, generator



¹ „Handbook of laser and optics” Ed. Frank Träger, Springer 2007.