

Ćwiczenie 5

Temat ćwiczenia: Badanie charakterystyk (właściwości) fotodiody

1. Wstęp

Detektory promieniowania optycznego (fotodetektory) są to elementy fotoczułe, służące do wykrywania i pomiaru mocy promieniowania elektromagnetycznego w zakresie światła widzialnego, promieniowania UV oraz promieniowania podczerwonego. Istnieje wiele kryteriów klasyfikacji fotodetektorów, np. ze względu na rodzaj wykorzystywanego zjawiska fotoelektrycznego, ze względu na budowę fotodetektora lub ze względu na zakres widmowy pracy fotodetektora. Przykładowo, ze względu na rodzaj wykorzystywanego zjawiska fotoelektrycznego dzielimy je na odbiorniki fotoelektryczne wykorzystujące zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne oraz odbiorniki fotoelektryczne wykorzystujące wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne.

Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne polega na tym, iż absorbowane fotony powodują generację par elektron-dziura. Tym samym, wzrasta liczba swobodnych nośników ładunków elektrycznych wewnątrz materiału. Wynikiem tego zjawiska jest malenie rezystancji właściwej półprzewodnika (lub nieprzewodnika) w stopniu zależnym od mocy padającego promieniowania (zjawisko fotoprzewodnictwa), bądź samoistna polaryzacja ciała (ściślej jego złącza), sprawiająca, że staje się ono źródłem siły elektromotorycznej (zjawisko fotowoltaiczne). Fotoprzewodnictwo wywołane przejściami z pasma do pasma nazywamy fotoprzewodnictwem samoistnym w odróżnieniu od fotoprzewodnictwa związanego z domieszkami. Napięcie powstałe na zaciskach złącza półprzewodnikowego przy oświetleniu go fotonami o energii większej od szerokości pasma zabronionego, nazywane jest napięciem fotoelektrycznym lub fotowoltaicznym. Zjawisko bezpośredniego przetwarzania energii promienistej na energię elektryczną w złączu p-n nazywane jest zjawiskiem fotowoltaicznym. Zjawisko to występuje w takich półprzewodnikowych elementach optoelektronicznych jak fotorezystory, fotoogniwa, fotodiody, fototranzystory, fototyristory.

Właściwości fotodetektorów opisują m.in. parametry fotoelektryczne oraz mechaniczne. Do parametrów fotoelektrycznych można zaliczyć czułość fotodetektora oraz detekcyjność. Natomiast parametry mechaniczne określają m.in. rodzaj stosowanej obudowy i jej wymiary, a także powierzchnię światłoczułą, której wielkość wpływa na inne parametry. Większość fotodetektorów pracuje w zakresie, w którym wyjściowy sygnał elektryczny jest proporcjonalny do sygnału padającego nań promieniowania. Stosunek przyrostów tych sygnałów nosi nazwę czułości.

W zależności od rodzaju sygnału wyjściowego wyróżnia się czułość napięciową S_n oraz czułość prądową S_I . Pierwszą z nich określa zależność:

$$S_n = \frac{\partial U_p}{\partial P_e} \quad (1)$$

gdzie U_p jest napięciem fotowoltaicznym, natomiast P_e oznacza moc promieniowania. Jednostką czułości napięciowej jest [V/W].

Z kolei czułość prądowa jest określona wzorem:

$$S_I = \frac{\partial I_p}{\partial P_e} \quad (2)$$

gdzie I_p jest prądem fotoelektrycznym. Jednostką czułości prądowej jest [A/W]

Czułość fotodetektorów zależy od długości fali padającego promieniowania λ , częstotliwości modulacji promieniowania f , powierzchni światłoczułej, a także od rezystancji obciążenia R_L . Ze względu na zależność czułości od długości fali, zwykle podawana jest monochromatyczna czułość widmowa dla określonej długości fali.

Kolejnym parametrem fotodetektorów jest moc równoważna szumom NEP (*Noise Equivalent Power*), czyli najmniejsza moc promieniowania, która może być odebrana przez fotodetektor. Mówiąc inaczej, jest to taka moc padająca na fotodetektor, dla której stosunek sygnału do szumu jest równy jedności. Przy danej mocy promieniowania padającego na fotodetektor większy sygnał na wyjściu uzyskuje się w fotodetektorze o większej czułości, jednakże mniejszą moc można wykryć za pomocą tego fotodetektora, który ma mniejszą moc równoważną szumowi. Odwrotność mocy równoważnej szumom nazywana jest detekcyjnością D . Detekcyjność charakteryzuje zdolność fotodetektora do reagowania na najmniejszą moc promieniowania elektromagnetycznego:

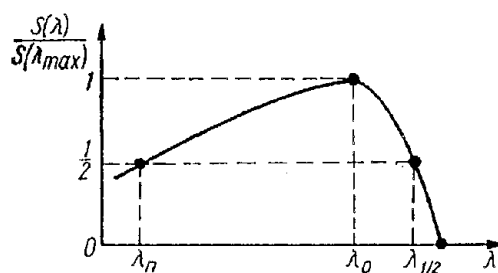
$$D = \frac{1}{NEP} \quad (3)$$

Detekcyjność znormalizowana D^* jest to odwrotność mocy równoważnej szumom pomnożona przez pierwiastek z iloczynu powierzchni detektora i szerokości pasma detekcji:

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP} \quad (4)$$

gdzie jest polem powierzchni A detektora, Δf oznacza szerokość pasma detekcji.

Każdy fotodetektor pracuje w typowym dla niego widmowym zakresie pracy, który jest częścią jego charakterystyki widmowej. Charakterystyka ta wyraża zależność czułości elementu w funkcji długości fali padającego nań promieniowania monochromatycznego, co zilustrowano na rys. 1. Charakterystykę widmową opisuje się zazwyczaj podając graniczne długości fali λ_0 , λ_{max} (czułość osiąga maksimum) oraz długość fali $\lambda_{1/2}$, dla której czułość spada do połowy swojej wartości maksymalnej.

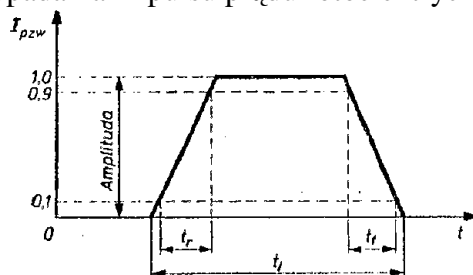


Rys. 1. Charakterystyka czułości widmowej fotodetektora z zaznaczonymi wartościami charakterystycznych parametrów.

Z punktu widzenia właściwego wyboru warunków pracy fotodetektora najbardziej przydatna jest charakterystyka prądowo-napięciowa, a właściwie rodzina tych charakterystyk dla różnych wartości natężenia padającego promieniowania. Charakterystyka prądowo-napięciowa pozwala wyznaczyć zakresy pracy poszczególnych fotodetektorów oraz punkty pracy przy określonym obciążeniu.

Poza wymienionymi wspólnymi parametrami elektrycznymi, każdy rodzaj fotodetektorów ma swoje specyficzne parametry w związku z odmiennym funkcjonowaniem. Przykładowo, dla fotodiod istotną wielkością jest maksymalne napięcie wsteczne, a dla fotoogniw wartość napięcia nieobciążonego fotoogniwa oraz wartość jego prądu zwarcia, inne wielkości definiuje się dla fototranzystorów. Wszystkie te wielkości, zarówno prądy jak i napięcia, są związane z charakterystykami prądowo-napięciowymi tych fotodetektorów.

Prędkość działania fotodetektorów jest określona przez częstotliwość graniczną lub czas narastania oraz opadania impulsu prądu fotoelektrycznego będącego odpowiedzią na prostokątny impuls świetlny. Ilustruje to rys. 2, gdzie I_p to prąd fotoelektryczny; t - czas; t_i - czas trwania impulsu prądu fotoelektrycznego; t_r - czas narastania impulsu prądu fotoelektrycznego; t_f - czas opadania impulsu prądu fotoelektrycznego.



Rys. 2. Parametry opisujące impuls fotoelektryczny

Czas narastania impulsu prądu fotoelektrycznego t_r jest to czas między momentami, w których impuls prądu fotoelektrycznego narasta od wartości 0,1 do wartości 0,9 amplitudy impulsu prądu fotoelektrycznego przy określonej rezystancji obciążenia, określonym napięciu polaryzacji, określonej długości fali i amplitudzie impulsu prądu fotoelektrycznego. Czas opadania impulsu prądu fotoelektrycznego t_f jest to czas między momentami, w którym impuls prądu fotoelektrycznego opada od wartości 0,9 do wartości 0,1 amplitudy impulsu prądu fotoelektrycznego przy określonej rezystancji obciążenia, napięciu polaryzacji, długości fali i amplitudzie impulsu prądu fotoelektrycznego.

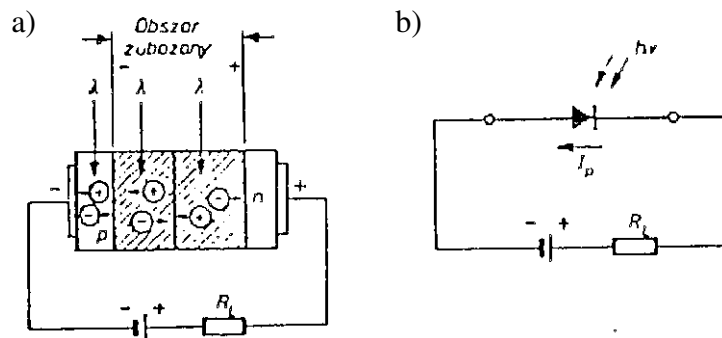
2. Fotodiody

Są to diody półprzewodnikowe ze złączem stanowiącym połączenie materiału półprzewodnikowego typu p oraz typu n, w których zakłócenia koncentracji nośników mniejszościowych dokonuje się za pomocą energii fotonów docierających do złącza przez odpowiednie okienko wykonane w obudowie fotodiody. Fotodiody wykonane mogą być jako zwykła, na złączu p-n, fotodiody PiN lub fotodiody lawinowe. Wytwarzane są również fotodiody ze złączem metal-półprzewodnik określane mianem fotodiod Schottky'ego, charakteryzujące się dużymi powierzchniami światłoczułymi i dużą prędkością działania. Fotodiody PiN jest to dioda, w której poprzez zastosowanie obszaru wysokorezystywnego obszaru i uzyskuje się większą czułość i prędkość działania niż w diodach konwencjonalnych. Przy polaryzacji wstecznej struktury PiN, obszar ładunku przestrzennego znajduje się głównie w warstwie typu i . W momencie zajęcia przez ładunek przestrzenny całej warstwy słabo domieszkowanej fotodiody zaczyna reprezentować pojemność. Wartość tej pojemności zmienia się przy wzroście napięcia na fotodiodzie tym mniej, im większą rezystywność ma obszar typu i . W fotodiodach lawinowych wykorzystuje się zjawisko lawinowego powielania nośników ładunku. Diody takie na skutek występowania w nich powielania nośników ładunku, powstałych w wyniku oświetlenia złącza $p-n$ spolaryzowanego wstecznie, charakteryzują się lepszymi własnościami od fotodiod p-n, w szczególności wielokrotnie większą czułością.

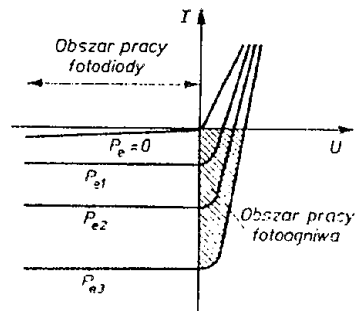
Fotodiody pracują przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym. W stanie ciemnym (przy braku oświetlenia) przez fotodiody płynie tylko prąd ciemny, będący prądem wstecznym złącza określonym przez termiczną generację nośników. Oświetlenie złącza powoduje generację dodatkowych nośników i wzrost prądu wstecznego złącza, proporcjonalny do natężenia padającego promieniowania. Fotodiody typu PiN posiadające między warstwami p oraz n warstwę półprzewodnika bez domieszkowania, charakteryzują się w porównaniu do innych fotodiod mniejszą pojemnością złącza, w efekcie czego elementy

typu PiN stosowane są w układach wielkiej częstotliwości.

Na rys. 3 przedstawiono ogólną zasadę działania fotodiody. W złączu tym powstaje prąd fotoelektryczny I_p . Fotodioda jest włączona szeregowo w obwód zasilania i spolaryzowana napięciem wstecznym. Charakterystyki $i(u)$ tej fotodiody dla różnych wartości oświetlenia pokazano na rys. 4 ($P_{e3} > P_{e2} > P_{e1}$). Przy braku oświetlenia w fotodiodzie płynie niewielki tzw. prąd "ciemny" I_0 , który tworzą głównie nośniki mniejszościowe. Prąd "jasny" I_L , płynący przez oświetlone i spolaryzowane w kierunku wstecznym złącze p-n jest równy $I_L = I_p - I_0$. Natężenie prądu I_p fotodiody rośnie proporcjonalnie do wzrostu mocy promieniowania.



Rys. 3. Przybliżona zasada działania fotodiody typu p-n: a) przepływ nośników w strukturze półprzewodnikowej, b) schemat włączenia fotodiody do obwodu

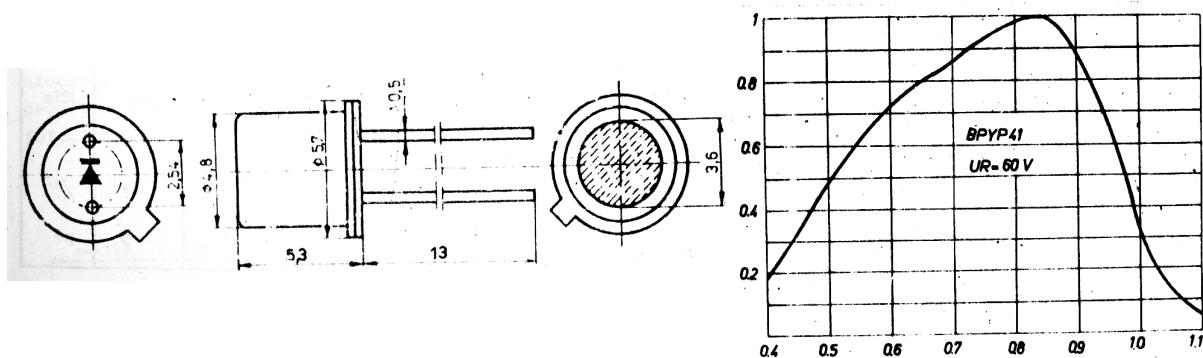


Rys. 4. Charakterystyki statyczne fotodiody

Jak widać na rys. 4, na charakterystykach fotodiody można wyróżnić obszar pracy diody jako fotoogniwo. W fotoogniwie energia promieniowania optycznego tworzy pary dziura-elektron. Podczas generacji nośników w obszarze zubożonym złącza p-n, elektrony podążają w kierunku obszaru typu n, natomiast dziury w kierunku obszaru typu p. W wyniku przepływu nośników ładunku w obszarze złącza powstaje bariera potencjału i różnica potencjału na zaciskach elementu. Wartość wytworzonego w fotoogniwie napięcia zależy od natężenia oświetlenia, przy czym zależność ta jest nieliniowa.

3. Zadania pomiarowe oraz zadania do opracowania w ramach sprawozdania

Przedmiotem badań w ramach niniejszego ćwiczenia jest fotodioda BPYP 41. Jest to dioda epiplanarna typu PiN. Element przeznaczony jest do detekcji promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni, zmodulowanego sygnałem w.cz. oraz szybko narastających impulsów tego promieniowania. Na rys. 5 przedstawiono zwymiarowaną obudowę badanej fotodiody oraz charakterystykę widmowej czułości.



Rys. 5. Obudowa oraz charakterystyka czułości widmowej fotodiody PiN BPYP 41

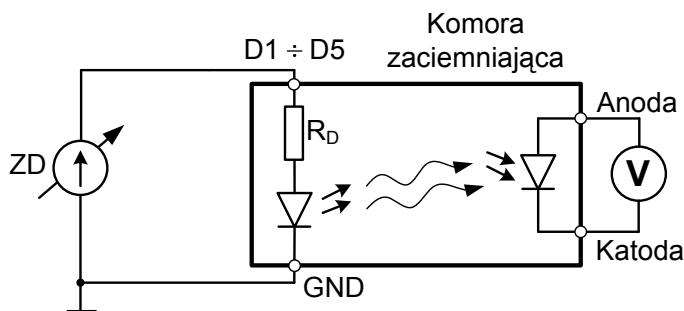
- **Pomiar charakterystyki widmowej czułości fotodiody**

Pomiary należy wykonać w układzie z rys. 6. Układ ten zawiera zaciemnioną komorę (obudowę), w której umieszczono badaną fotodiode oraz fotoemitery – zastosowano diody LED promieniujące z taką samą mocą optyczną. Zaciski znajdujące się na obudowie oznaczają:

- A – anoda fotodiody, K – katoda fotodiody,
- D1, D2, D3, D4, D5 – anody fotoemiterów,
- GND – wspólna masa (uziemiaenie) fotoemiterów.

Użyte fotoemitery charakteryzują się następującymi długościami fali promieniowania, przy której występuje maksimum emisyjności: D1 – 470 nm, D2 – 530 nm, D3 – 590 nm, D4 – 630 nm, D5 – 930 nm. W obudowie oprócz fotoelementów umieszczono także rezystory odpowiednio ograniczające prąd fotoemiterów.

W celu wykonania pomiarów należy na zasilaczu ZD ustawić wartość napięcia równą 3 V. Następnie należy kolejno polaryzować fotoemitery, jednocześnie odczytując wartość napięcia na fotodiodzie pracującej w trybie fotowoltaicznym.



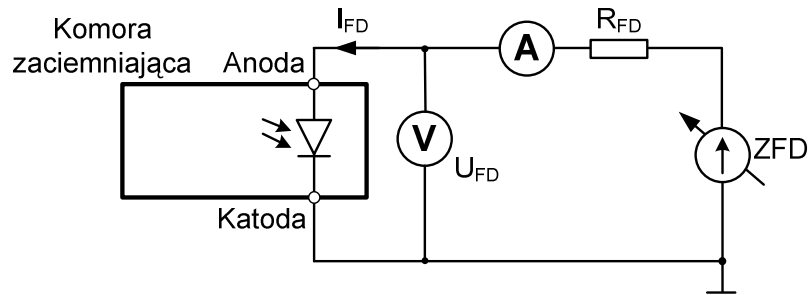
Rys. 6. Układ do pomiaru charakterystyki widmowej czułości fotodiody

Zadania do wykonania w ramach sprawozdania:

Największą uzyskaną na fotodiodzie wartość napięcia należy traktować jako maksimum jej czułości. Do tej wartości należy odnieść pozostałe otrzymane wyniki pomiarów, tak aby następnie wykreślić znormalizowaną charakterystykę widmowej czułości badanej fotodiody. Maksimum takiej charakterystyki przyjmuje wartość równą jeden. W sprawozdaniu należy przedstawić na wspólnym wykresie charakterystykę znormalizowaną uzyskaną z pomiarów oraz charakterystykę podaną przez producenta. Skomentować uzyskane wyniki.

- **Pomiar charakterystyki ciemnej fotodiody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia**

Pomiary należy wykonać w układzie z rys. 7. W celu wykonania pomiarów w pierwszym kroku należy na zasilaczu ZFD ustawić wartość napięcia równą 0 V. Fotodiode należy spolaryzować w kierunku przewodzenia poprzez rezystor R_{FD} o wartości 10 Ω . Poprzez zwiększanie wartości napięcia zasilającego należy dokonać z określoną rozdzielczością pomiaru ciemnej charakterystyki prądowo-napięciowej fotodiody przy polaryzacji przewodzącej. Pomiar wykonać do wartości prądu równej 40 mA.



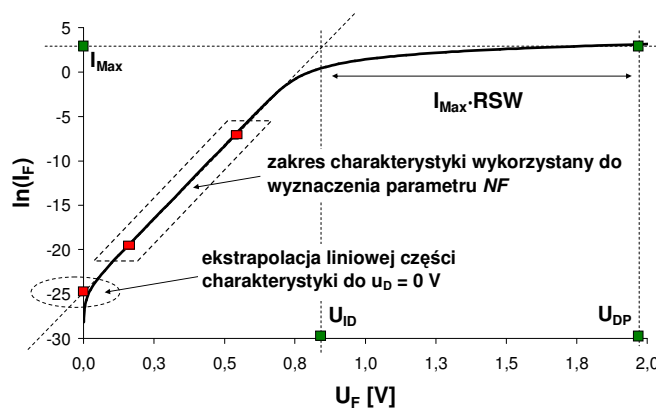
Rys. 7. Układ do pomiaru ciemnej charakterystyki prądowo-napięciowej fotodiody

Zadania do wykonania w ramach sprawozdania:

Na podstawie wykonanych pomiarów należy wykreślić badaną charakterystykę. Określić napięcie przewodzenia fotodiody bazując na modelu diody odcinkami liniowym. Z wykorzystaniem poniżej opisanej metody wyznaczyć wartość prądu nasycenia fotodiody. Skomentować uzyskane wyniki.

Metoda wyznaczenia prądu nasycenia I_S fotodiody:

Należy wykreślić charakterystykę $\ln(i_F) = f(u_F)$. Przedłużenie prostej pokrywającej się z liniową częścią zmierzonych charakterystyki do osi prądowej dla napięcia równego zero pozwala uzyskać punkt przecięcia z tą osią. Wartość tego punktu leżącego na osi rzędnych jest estymowanym prądem nasycenia.



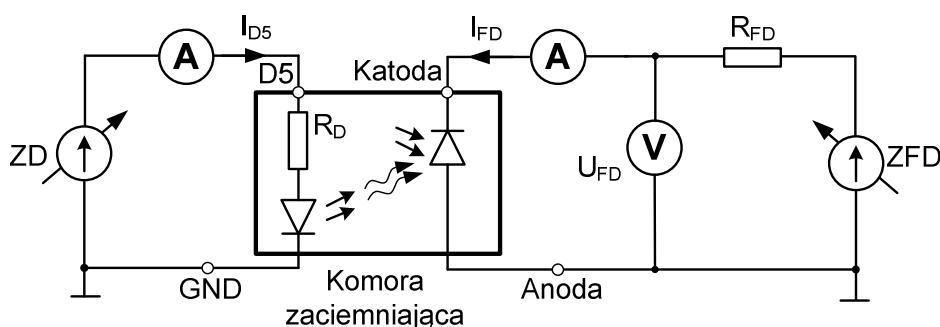
Rys. 8. Ilustracja sposobu wyznaczenia wartości prądu nasycenia fotodiody

- **Pomiar charakterystyk statycznych fotodiody spolaryzowanej w kierunku zaporowym**

W układzie z rys. 9 należy przeprowadzić pomiary charakterystyk statycznych fotodiody spolaryzowanej zaporowo $I_{FD} = f(U_{FD})$ dla trzech różnych warunków oświetlenia promieniowaniem z zakresu podczerwieni emitowanym przez D5:

- a) brak oświetlenia P_0 – dioda D5 niespolaryzowana,
- b) oświetlenie P_1 – dioda D5 spolaryzowana prądem 10 mA,
- c) oświetlenie $P_2 > P_1$ – dioda D5 spolaryzowana prądem 20 mA,
- d) oświetlenie $P_3 > P_2$ – dioda D5 spolaryzowana prądem 40 mA.

Fotodioda jest zasilana z zasilacza ZFD, który pozwala zmieniać punkt pracy elementu. Napięcie U_{FD} należy regulować w przedziale od 0 do 50 V, z krokiem 2,5 V, tak aby nie przekroczyć wartość prądu 1 mA. Fotodiodę należy spolaryzować poprzez rezystor R_{FD} o wartości 1 M Ω .



Rys. 9. Układ do pomiaru charakterystyk statycznych fotodiody spolaryzowanej w kierunku zaporowym

Zadania do wykonania w ramach sprawozdania:

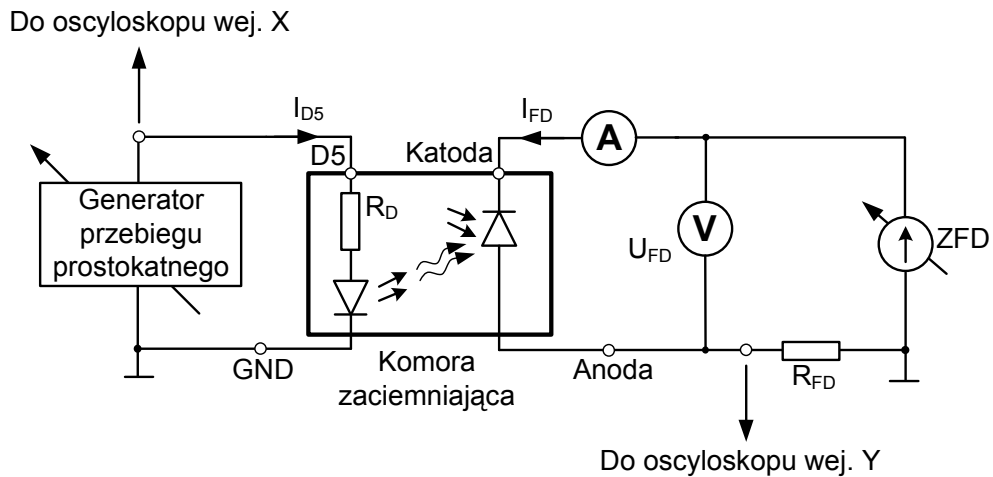
Na podstawie wykonanych pomiarów należy wykreślić badane charakterystyki wsteczne na jednym wspólnym wykresie. Należy również wykonać drugi wykres przedstawiający zależność prądu fotodiody I_{FD} od prądu wejściowego I_{D5} dla trzech stałych wartości napięcia wstecznego równych 5 V, 25 V oraz 45 V (cięcie asymptotyczne napięciowe zmierzonych charakterystyk wstecznych). Skomentować uzyskane wyniki.

- **Pomiar właściwości dynamicznych fotodiody**

W układzie z rys. 10 należy ustalić/zmierzyć częstotliwość graniczną pracy fotodiody oraz zaobserwować na oscyloskopie impulsy fotoelektryczne.

W tym celu fotodiodę należy spolaryzować napięciem wstecznym o wartości 25 V z użyciem rezystora R_{FD} o wartości 10 k Ω . Poziom i częstotliwość sygnału prostokątnego należy wstępnie ustalić tak, aby na ekranie oscyloskopu pojawiły się impulsy fotoelektryczne. Następnie regulując częstotliwość sygnału pobudzającego fotoemiter należy określić górną częstotliwość graniczną fotodiody.

Kolejnym krokiem, jest przeanalizowanie wpływu poziomu sygnału pobudzającego, napięcia spolaryzującego fotodiodę oraz rezystancji obciążenia fotodiody R_{FD} na kształt i poziom impulsów fotoelektrycznych.



Rys. 10. Układ do pomiaru parametrów dynamicznych fotodiody

Zadania do wykonania w ramach sprawozdania:

Na podstawie wykonanych pomiarów należy podać zmierzone wartości rozważanych parametrów dynamicznych oraz opisać zaobserwowany podczas laboratorium wpływ wybranych czynników na kształt i poziom impulsów fotoelektrycznych. Skomentować uzyskane wyniki.