

## Ćwiczenie 6

### WŁASNOŚCI DYNAMICZNE DIOD

#### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie własności dynamicznych diod półprzewodnikowych. Obejmuje ono zbadanie stanów przejściowych podczas procesu przełączania tego typu przyrządów półprzewodnikowych.

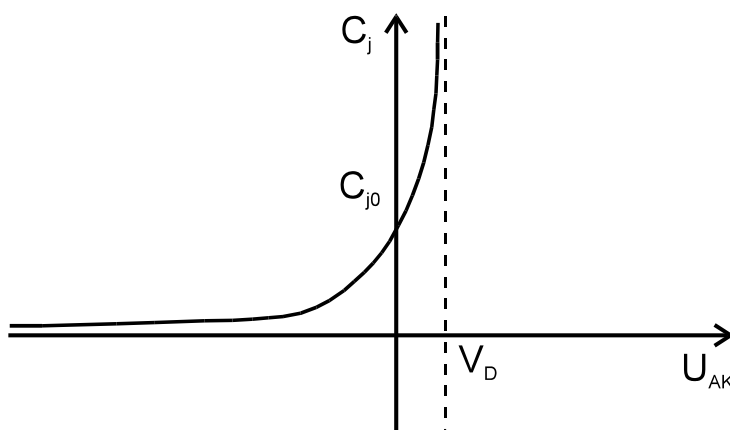
#### 2. Wiadomości podstawowe

Wspólną charakterystyczną cechą przyrządów bipolarnych jest tzw. "sterowanie prądowe" polegające na tym, że każda zmiana stanu pracy przyrządu wymaga zmiany koncentracji nośników w wyniku dostarczenia lub usunięcia nośników ładunku elektrycznego. Proces ten, analogiczny do procesu przeładowania pojemności w obwodzie elektrycznym, wymaga odpowiedniego czasu, co powoduje, że wszelkie zmiany warunków pracy przyrządów bipolarnych nie zachodzą skokowo, ale są procesami o stosunkowo dużej inercji.

##### 2.1. Opis działania diody p-n dla stanów przejściowych

Przy zmianie polaryzacji diody z kierunku zaporowego na kierunek przewodzenia następuje ładowanie pojemności złączowej.

Pojemność złączowa  $C_j$  jest związana z występowaniem obszaru ładunku przestrzennego na złączu. Ładunek ten powstaje w wyniku usunięcia z obszaru złącza ruchomych nośników i pozostawieniu w nim nieskompensowanych jonów domieszek. Tak więc po stronie n występuje warstwa dodatniego ładunku utworzona przez jony donorowe, a po stronie p warstwa ładunku ujemnego utworzona przez jony akceptorowe. Wymiary tych warstw nie są stałe, lecz ulegają zmianom wraz ze zmianami warunków pracy diody w wyniku odprowadzania lub doprowadzania do nich tej samej ilości elektronów do warstwy po stronie n złącza i dziur do warstwy po stronie p złącza. Przebieg tego zjawiska jest analogiczny z procesem przeładowania kondensatora płaskiego o zmiennym odstępem między płytkami, równym szerokości obszaru ładunku przestrzennego. Ponieważ szerokość ta zmienia się wraz ze zmianą napięcia polaryzującego diodę, pojemność  $C_j$  jest pojemnością nieliniową, zależną od tego napięcia, jak to ilustruje rys.1. Chociaż największe wartości przyjmuje ona dla napięć odpowiadających polaryzacji w kierunku przewodzenia, jej wpływ na procesy przejściowe w diodzie jest największy przy polaryzacji wstecznej.



Rys. 1. Zależność wartości pojemności złączowej od napięcia polaryzacji

Wartość prądu ładowania tej pojemności zależy od jej wartości, od stromości narastania napięcia źródła zasilającego (najczęściej generatora napięć prostokątnych) oraz parametrów obwodu w tym indukcyjności montażowych.

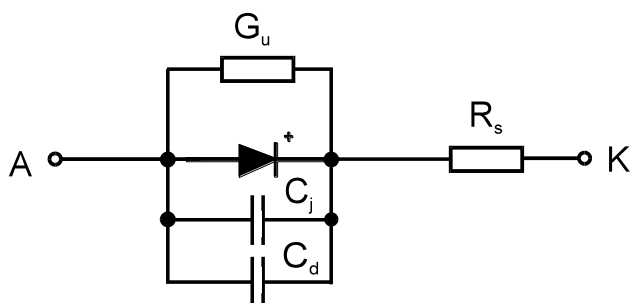
Po naładowaniu pojemności złączowej (czas opóźnienia załączania) rozpoczyna się proces wstrzykiwania nośników mniejszościowych do obydwu warstw diody. Procesowi temu towarzyszy uzupełnianie nośników

większościowych poprzez złącza „ms”. W rezultacie koncentracja nośników w diodzie rośnie zachowując zasadę obojętności ładunku. Ten wzrost powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa rekombinacji co w rezultacie uniemożliwia dalszy wzrost koncentracji nośników. Z kolei wzrost koncentracji nośników powoduje zmniejszenie rezystywności obydwu warstw półprzewodnika, czemu towarzyszy zmniejszanie się spadku napięcia na diodzie a tym samym umożliwia dalszy wzrost prądu w obwodzie (czas załączania).

W chwili zmiany napięcia generatora prąd w obwodzie zmienia swój kierunek usuwając nośniki z diody (czas opóźnienia wyłączenia). Oprócz tego nośniki są usuwane przez proces rekombinacji. Napięcie na diodzie ulega niewielkiemu obniżeniu wskutek zmiany kierunku spadku napięcia na rezystancji półprzewodnika. Jednak ponieważ przy dużej koncentracji nośników nie może powstać bariera na złączu „pn” dodatnie napięcie na diodzie utrzymują bariery na złączach „ms”. Prąd wsteczny diody powoduje usuwanie nośników mniejszościowych przez ich przemieszczenie do warstw sąsiednich gdzie stają się nośnikami większościowymi zaś nośniki większościowe przechodząc przez złącza „ms” oddają swoją energię z powrotem do obwodu.

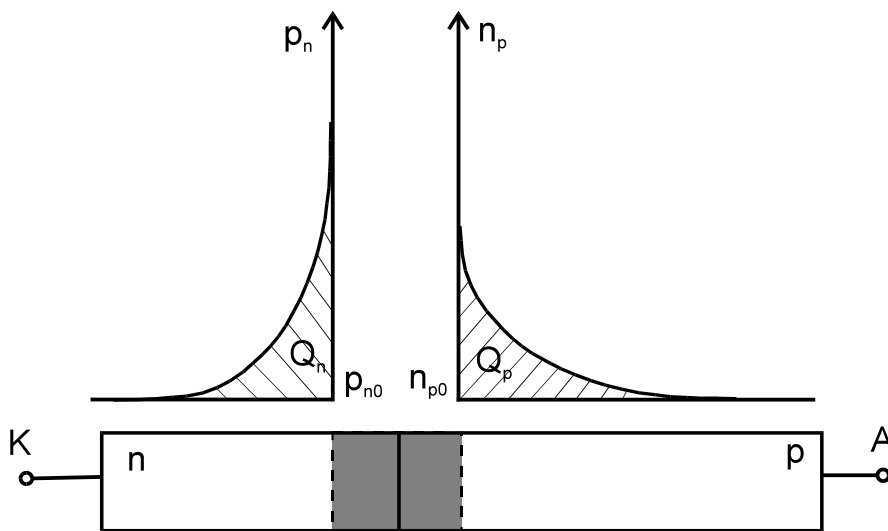
Po usunięciu nośników z diody powstaje znów bariera na złączu „pn” (czas wyłączenia) powodując początkowo zmniejszenie napięcia na diodzie a następnie w wyniku ładowania pojemności złączonej napięcie na diodzie jest znów ujemne.

Najczęściej z uwagi na jego prostotę do analizy obwodów zawierających diody używa się schematu zastępczego przedstawionego na rys. 2.



Rys.2. Schemat zastępczy diody p-n dla stanów dynamicznych

Występująca w tym schemacie pojemność dyfuzyjna  $C_d$  ma odwzorować procesy gromadzenia i usuwania energii nagromadzonej w diodzie w postaci energii nośników. Pojemność ta jest również silnie nieliniowa bowiem ilość energii nagromadzonej w nośnikach zależy od prądu zaś energia w pojemności zależy od napięcia. Stąd mimo swojej prostoty używanie tego schematu zastępczego nie jest zbyt łatwe a wyniki analizy zwłaszcza układów komutacyjnych obciążone znacznymi błędami. Mimo to, jest to schemat najczęściej przedstawiany w literaturze.

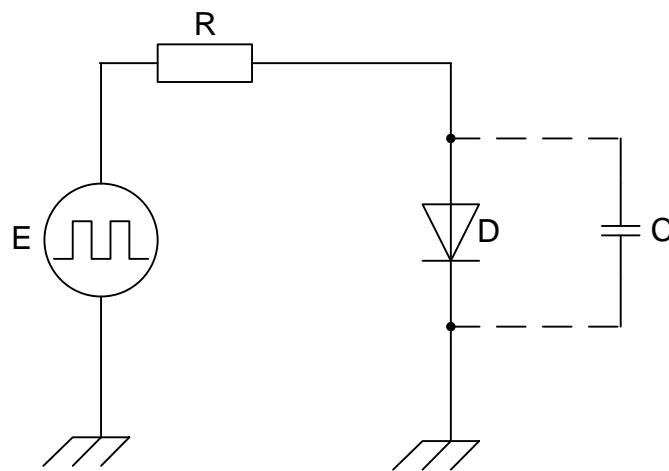


Rys.3. Rozkłady nośników w diodzie p-n spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

Schemat zastępczy diody rzeczywistej dla stanów dynamicznych przedstawiono na rys.2. Obok elementów odpowiedzialnych za kształt charakterystyki statycznej, do których należą dioda idealna  $D_i$  (patrz opis ćwic. „Parametry statyczne diod półprzewodnikowych”), rezystancja szeregową  $R_s$  oraz konduktancja upływu  $G_u$ , zawiera on dwie pojemności: pojemność złączową  $C_j$  i pojemność dyfuzyjną  $C_d$ .

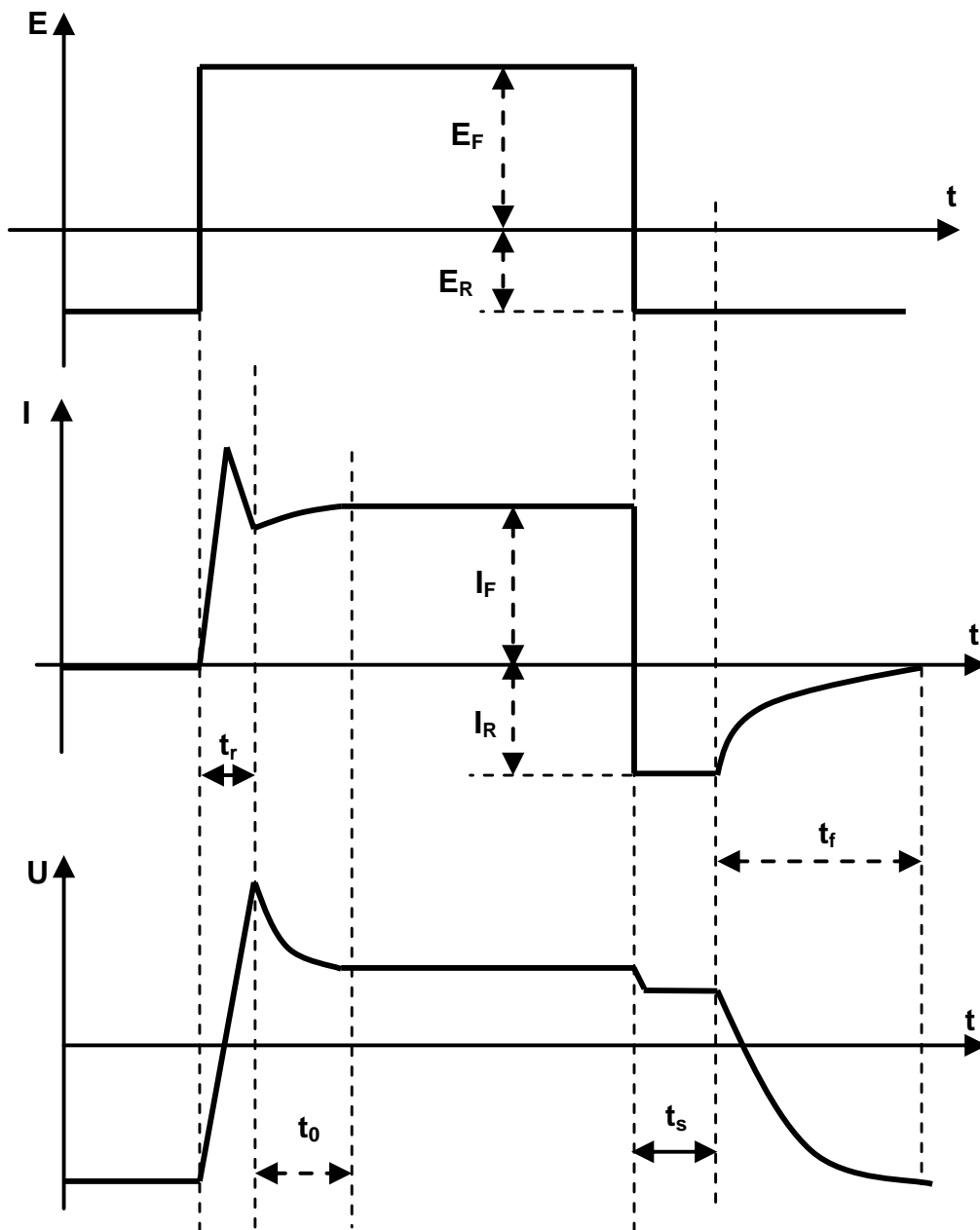
## 2.2. Przełączanie diody p-n.

Zasadniczą rolą diody w układach przełączających jest umożliwienie przepływu prądu w jednym kierunku i blokowanie jego przepływu w kierunku przeciwnym. Dioda idealna pracująca w takim układzie powinna charakteryzować się zerową rezystancją w kierunku przewodzenia, nieskończenie wielką rezystancją w kierunku zaporowym oraz zupełnym brakiem inercji podczas przełączania. Dioda rzeczywista nie spełnia oczywiście tych warunków. Jej przełączanie zachodzi z pewną inercją, a kształt impulsów prądu i napięcia ulega zniekształceniom.



Rys.4. Podstawowy układ przełączania diody

Podstawowy układ przełączania diody jest przedstawiony na rys.4. Źródło prostokątnych impulsów napięciowych  $E_g$  powoduje przełączanie diody ze stanu polaryzacji wstecznej w stan przewodzenia i odwrotnie. Jeżeli rezystancja  $R$  w obwodzie jest dużo większa od rezystancji diody w stanie przewodzenia i jednocześnie dużo mniejsza od rezystancji diody w stanie polaryzacji wstecznej, to przełączanie diody w takim układzie jest tzw. przełączaniem prądowym. Przebiegi napięć i prądów podczas takiego przełączania są przedstawione na rys.5.



Rys.5. Zmiany napięcia i prądu podczas prądowego przełączania diody

Proces przełączania diody rozpoczyna się w chwili  $t = 0$  odpowiadającej zmianie napięcia generatora z wartości ujemnej  $-E_R$  na wartość dodatnią  $E_F$ . Do tego momentu dioda była spolaryzowana w kierunku wstecznym i płynął przez nią prąd wsteczny  $I_s$ . Zmiana napięcia zasilającego diodę inicjuje proces przeładowania pojemności diody. W pierwszej kolejności jest przeładowywana pojemność złączowa  $C_j$  czemu towarzyszy spadek napięcia polaryzacji wstecznej diody. Po zmianie kierunku polaryzacji dominującego znaczenia nabiera proces gromadzenia nośników w diodzie - ładowania pojemności dyfuzyjnej  $C_d$  oraz zmniejszanie rezystywności - czas załączania  $t_0$ . Czas narastania napięcia na diodzie  $t_r$ , dla przypadku gdy napięcie  $E_F$  jest dużo większe od napięcia przewodzenia diody  $U_0$ , można w przybliżeniu określić korzystając z wyrażenia:

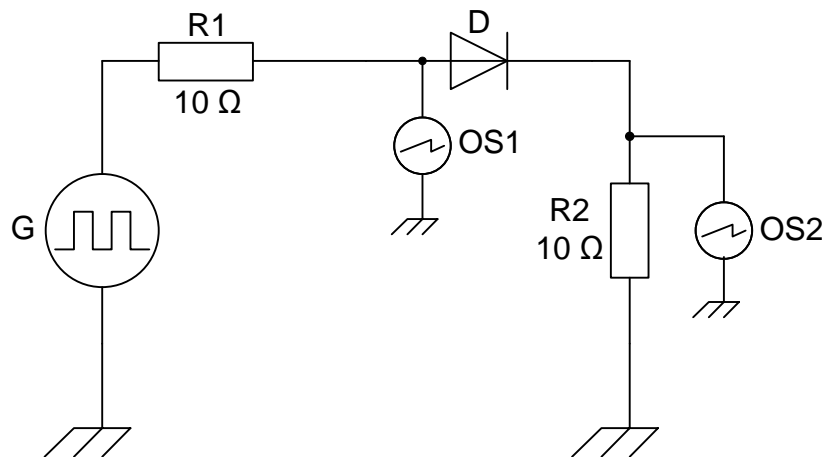
$$t_r = 0.7 RC_i$$

gdzie  $C_i$  reprezentuje pojemność złączową diody.

Proces przełączania diody ze stanu przewodzenia w stan polaryzacji wstecznej rozpoczyna się z chwilą zmiany napięcia generatora z wartości  $E_F$  na wartość  $-E_R$ . Można wyodrębnić w nim dwa etapy. W etapie pierwszym, któremu odpowiada przedział czasowy  $t_s$  (rys.5), są usuwane nośniki, czyli zachodzi proces rozładowywania pojemności dyfuzyjnej diody. W tym czasie przez diodę płynie prąd wsteczny ograniczony jedynie rezystancją zewnętrzną  $R$ , a sama dioda do momentu usunięcia nośników -rozładowania pojemności dyfuzyjnej znajduje się w stanie przewodzenia – dodatnie napięcie na diodzie utrzymywane jest głównie przez bariery na złączach „ms”, czego efektem jest występowanie na niej niewielkiego napięcia w kierunku przewodzenia. Napięcie wsteczne pojawia się na diodzie w chwili zakończenia usuwania nośników -rozładowywania pojemności dyfuzyjnej a tym samym powstawania bariery na złączu „pn”. Jest to początek drugiego etapu procesu przełączania, w którym mamy do czynienia z przeładowaniem pojemności złączowej diody czemu towarzyszy narastanie napięcia na diodzie aż do ustalonej wartości  $-E_R$ . Łączny czas trwania obu etapów jest definiowany jako czas wyłączenia diody  $t_{off} = t_s + t_r$ .

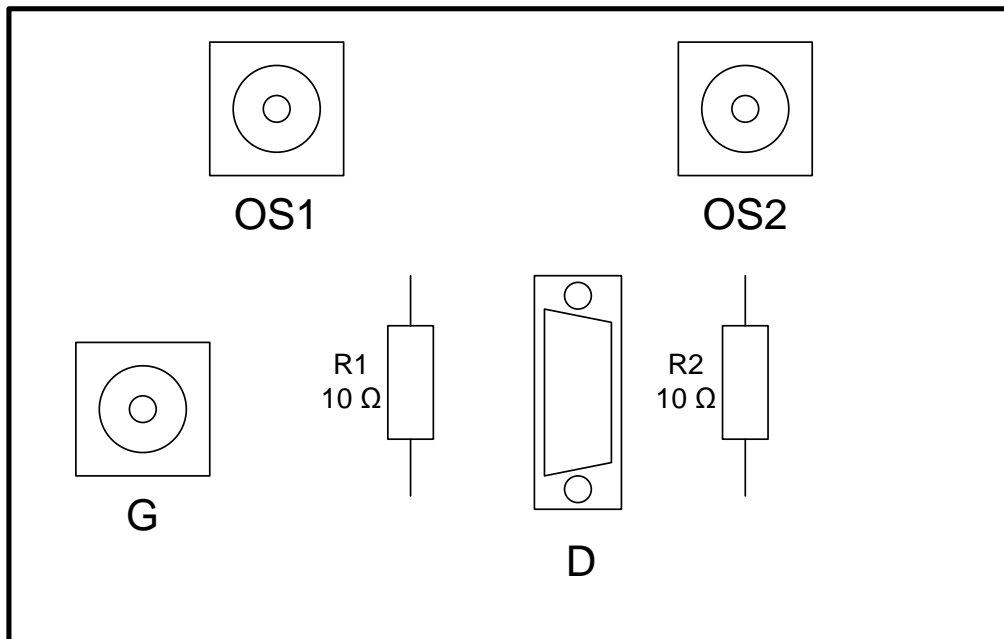
### Wykonanie ćwiczenia

Schemat układu pomiarowego jest pokazany na rys.6.



Rys.6. Schemat układu pomiarowego do badania stanów dynamicznych diod.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy podłączyć kanał pierwszy CH1 oscyloskopu do gniazda OS1 na płycie pomiarowej oraz kanał drugi CH2 do gniazda OS2. Do gniazda G trzeba doprowadzić sygnał z generatora funkcyjnego. Umieszczenie gniazd jest pokazane na rys.7.



Rys.7. Wygląd płytki pomiarowej.

Wykonanie ćwiczenia należy rozpocząć od ustawienia sygnału z generatora. Należy wybrać generację sygnału **prostokątnego** (fala prostokątna, wypełnienie 50%) i ustawić jego amplitudę na wartość **2,5V**.

Diody należy przebadać przy następujących częstotliwościach sygnału pobieranego z generatora: **10Hz, 50Hz, 10kHz, 100kHz, 400kHz, 1MHz**. Dodatkowo diodę LED należy przebadać przy częstotliwości sygnału wejściowego równej **1Hz**.

W trakcie obserwacji przebiegów na oscyloskopie należy korzystać z możliwości skalowania wartości napięcia oraz czasu przypadającej na jedną działkę oznaczoną na ekranie. W przypadku gdy przebieg jest „zaszumiony” należy skorzystać z możliwości uśredniania oscylogramu (polecenie AVERAGE w menu ACQUIRE; wartość 4 lub 16).

#### Opracowanie wyników

- Przerysować z monitora oscyloskopu przebiegi prądów i napięć na badanych diodach obserwowane w trakcie wykonywania ćwiczenia.  
**Uwaga!** Rysunki należy wykonać ze szczególną starannością uwzględniając wszelkie zmiany przebiegu sygnału na oscylogramach. Przebiegi prądu i napięcia dla danego elementu powinny być narysowane na jednej osi czasu, tak aby wyraźnie było widać początek okresu (jednakowy dla obu przebiegów). Na rysunkach należy wyraźnie oznaczyć wartości czasowe oraz prądów i napięć w charakterystycznych fragmentach przebiegów.
- Wyznaczyć rzeczywisty przebieg napięcia na diodzie, pamiętając, że oscylogram OS1 pokazuje przebieg napięcia na połączeniu szeregowym diody i rezystora R2.
- W przypadku diody prostowniczej wyznaczyć częstotliwość, dla której czas odzyskiwania zdolności zaworowych jest dłuższy od czasu trwania napięcia blokowania.
- Zaobserwować przy jakiej częstotliwości sygnału wejściowego dioda LED zaczyna świecić światłem ciągłym (brak efektu migotania)
- Porównać czasy odzyskiwania zdolności zaworowych (blokowania) dla badanych diod.