



Politechnika Lubelska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A  
[www.kueitwn.pollub.pl](http://www.kueitwn.pollub.pl)

---

## **LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 11**

Badanie podstawowych właściwości warikapów

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest:

- określenie zmian pojemności, w zależności od przyłożonego napięcia, w warunkach polaryzacji zaporowej diody,
- porównanie badanych diod.

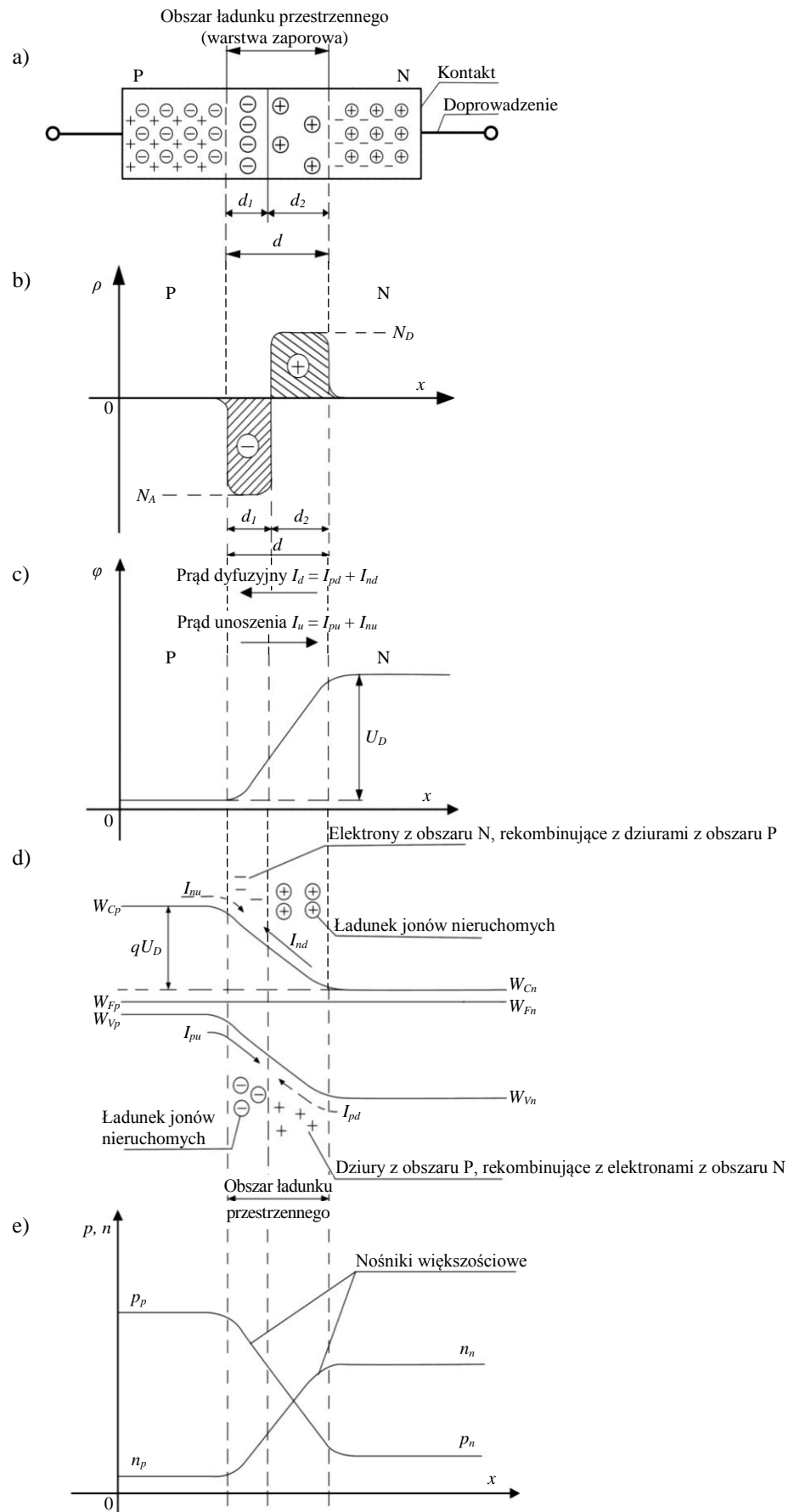
## 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

W większości elementów półprzewodnikowych (diodach, tranzystorach bipolarnych, tyrystorach, itd.) występują różnego rodzaju złącza. **Złączeniem** nazywa się atomowo ścisły styk dwóch kryształów ciała stałego. Odległość między stykającymi się obszarami jest porównywalna z odległościami między atomami w kryształach. W elektronice najszersze zastosowanie mają złącza **przewodnik - półprzewodnik** i **metal - półprzewodnik** (złącze m - p jest również nazywane złączem Schottky'ego). Do pierwszych z nich zalicza się: złącza dwóch półprzewodników o różnym typie przewodnictwa (złącza p - n), złącza dwóch półprzewodników o takim samym typie przewodnictwa, ale o różnej koncentracji domieszek, np. obszarów  $n$  i  $n^+$  lub obszarów  $p$  i  $p^+$ , złącza różnorodnych półprzewodników, np. german - krzem (są to tzw. heterozłącza). Najprostszymi dwuelektrodowymi elementami półprzewodnikowymi, wykorzystującymi właściwości złączy półprzewodnikowych, najczęściej p - n i m - p, są diody półprzewodnikowe.

### 2.1. Właściwości złączy p - n

Złącze stanowi warstwę przejściową między obszarem półprzewodnika typu  $p$  i półprzewodnika typu  $n$ . Domieszka akceptorowa w obszarze typu  $p$  sprawia, że koncentracja dziur w tym obszarze jest większa niż elektronów (przewodnictwo dziurowe). Natomiast domieszka donorowa w obszarze typu  $n$  prowadzi do przewagi elektronów w tym obszarze (przewodnictwo elektronowe). Dziury w obszarze  $p$  i elektrony w obszarze  $n$  stanowią nośniki większościowe. Przed zetknięciem każdy z obszarów jest elektrycznie obojętny, ponieważ ładunek dziur i elektronów zostaje skompensowany ładunkiem jonów domieszek, umieszczonych w węzłach siatki krystalicznej. Po zetknięciu dwóch obszarów  $p$  i  $n$ , w pobliżu płaszczyzny złącza istnieją gradienty koncentracji dziur i elektronów (rysunek 1a). Różnica koncentracji nośników ładunku powoduje ich przemieszczanie, które nazywa się dyfuzją. Elektrony z obszaru przyłączonego typu  $n$  dyfundują do obszaru typu  $p$ . Podobnie dziury z obszaru przyłączonego typu  $p$  przechodzą do obszaru typu  $n$ . Prądy dyfuzyjne  $I_{pd}$  dziur oraz  $I_{nd}$  elektronów są proporcjonalne do gradientu koncentracji domieszek.

# Ćw. 11. Badanie podstawowych właściwości warikapów



Rys. 1. Złącze p - n bez polaryzacji: a) nośniki w obszarach p i n, b) gęstość ładunku przestrzennego w warstwie zaporowej, c) rozkład potencjału, d) model pasmowy, e) gęstość nośników

Oznaczenia do rysunku 1:

- ⊕ - jony domieszki donorowej,
- +
- ⊖ - jony domieszki akceptorowej,
- - elektrony,
- $W_{Cp}, W_{Cn}$  - dolna krawędź pasma przewodnictwa w obszarach  $p$  i  $n$ ,
- $W_{Vp}, W_{Vn}$  - górna krawędź pasma walencyjnego w obszarach  $p$  i  $n$ ,
- $W_{Fp}, W_{Fn}$  - poziom Fermiego w obszarach  $p$  i  $n$ .

Nośniki przedostające się do przeciwnych obszarów stają się nadmiarowymi nośnikami mniejszościowymi w tych obszarach. Rekombinują one z nośnikami większościowymi, które nie przeszły na drugą stronę złącza. W wyniku tego w obszarze typu  $n$  powstaje nadmiar ładunku jonów dodatnich (donorów), a w obszarze typu  $p$  - nadmiar ładunku jonów ujemnych (akceptorów). Są to ładunki jonów nieruchomych, ulokowanych w węzłach siatki krystalicznej. W obszarach przyzłączowych powstaje wówczas podwójna warstwa nieskompensowanych ładunków. Nazywa się ona **obszarem ładunku przestrzennego, warstwą zaporową** lub **obszarem zubożonym** (rysunek 1b), gdzie nie ma praktycznie nośników większościowych.

Po utworzeniu warstwy zaporowej przepływ nośników większościowych zostaje zahamowany. Ładunek przestrzenny dodatni po stronie  $n$  hamuje przepływ dziur z obszaru typu  $p$  do obszaru typu  $n$ , natomiast ładunek przestrzenny ujemny po stronie  $p$  hamuje przepływ elektronów z obszaru typu  $n$  do obszaru typu  $p$ . Tworzy się pole elektryczne, reprezentowane przez barierę potencjału. Wysokość bariery, a więc różnica potencjałów, nazywa się **napięciem dyfuzyjnym**, które jest określone wzorem:

$$U_D = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (1)$$

gdzie:  $q$  - ładunek elektronu,  $k$  - stała Boltzmanna,  $T$  - temperatura bezwzględna,  $N_A$ ,  $N_D$  - koncentracja akceptorów i donorów,  $n_i$  - koncentracja samoistna półprzewodnika.

W temperaturze bliskiej pokojowej dla złączy krzemowych  $U_D \approx 0,3 \div 0,6$  V, a dla złączy germanowych  $U_D \approx 0,1 \div 0,3$  V i zmniejsza się przy wzroście temperatury o około 2,3 mV/K.

Pole elektryczne wytworzone przez ładunek przestrzenny sprzyja przepływowi nośników mniejszościowych. Nośniki mniejszościowe (elektrony w obszarze typu  $p$  oraz dziury w obszarze typu  $n$ ) powstają w wyniku generacji termicznej. Niektóre z nich dyfundują ku krawędziom warstwy zaporowej i przechodzą na drugą stronę. Oprócz prądów dyfuzyjnych nośników większościowych przez złącze płyną prądy unoszenia  $I_{pu}$  oraz  $I_{nu}$  nośników mniejszościowych. Kierunki tych prądów są przeciwne do kierunków prądów dyfuzyjnych (rysunek 1c).

**Stan równowagi** złącza występuje wtedy, kiedy liczba unoszonych nośników mniejszościowych jest równa liczbie dyfundujących nośników większościowych, a więc prawdziwe są wówczas zależności:

$$I_{pd} + I_{pu} = 0, \quad (2)$$

$$I_{nd} + I_{nu} = 0 \quad (3)$$

Powstaniu ładunku przestrzennego w modelu pasmowym złącza (rysunek 1d) odpowiada przesunięcie położenia pasm energetycznych. Różnica energii jest proporcjonalna do napięcia dyfuzyjnego. Poziom Fermiego dla obu części półprzewodnika ma natomiast położenie jednakowe.

**Szerokość warstwy zaporowej**  $d$  (rysunek 1a) zależy od koncentracji domieszek po obu stronach złącza i napięcia dyfuzyjnego:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}} U_D, \quad (4)$$

gdzie:  $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$  - przenikalność elektryczna półprzewodnika.

Najczęściej szerokość warstwy zaporowej  $d = 0,1 \div 0,5 \mu\text{m}$ . Jeżeli koncentracja domieszek jednego z obszarów jest mniejsza niż drugiego, to głębiej w obszar ten wnikną nośniki ładunku z obszaru drugiego, przy czym szerokość  $d_2 > d_1$ .

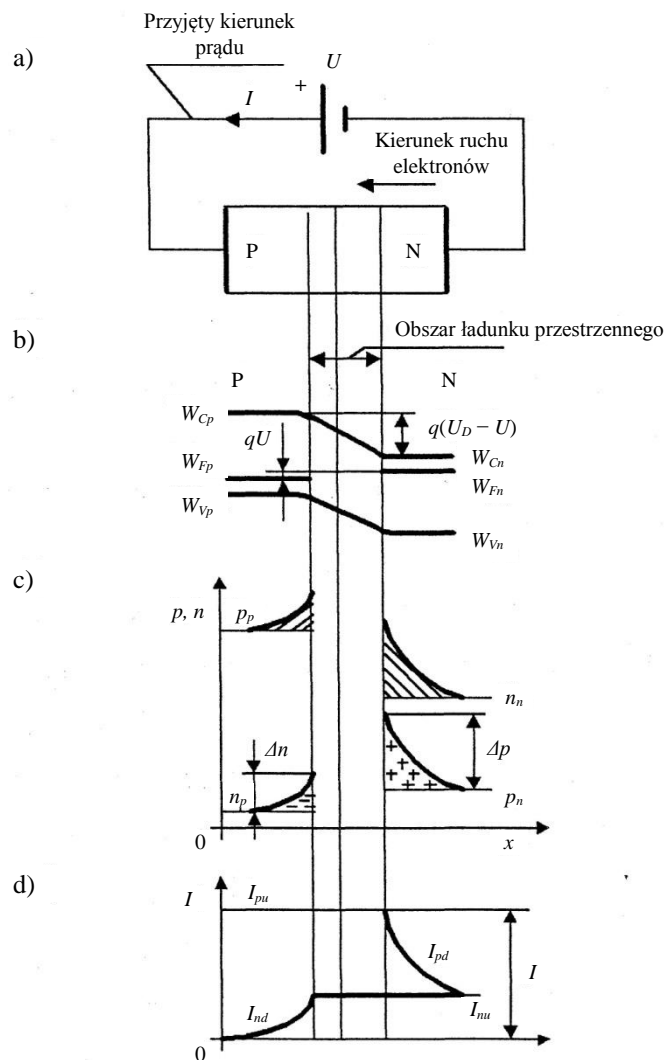
Doprowadzenie z zewnątrz napięcia do złącza zakłóca stan równowagi elektrycznej. Dla większości złącz można przyjąć, że całe przyłożone napięcie przypada na obszar ładunku przestrzennego. Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia, tzn. tak, że do obszaru typu  $p$  jest dołączony biegun dodatni źródła zasilania, a do obszaru typu  $n$  ujemny (rysunek 2a), zmniejsza się bariera potencjału do wartości  $U_D - U$ , gdzie  $U$  - napięcie zewnętrzne (rysunek 2b). Jednocześnie maleje szerokość warstwy zaporowej (we wzorze (4) zamiast  $U_D$  należy podstawić  $U_D - U$ ), a także maleje ładunek oraz natężenie pola elektrycznego. Zmniejszenie bariery potencjału powoduje wzrost prądu dyfuzyjnego, tj. wzrost liczby dziur przechodzących z obszaru typu  $p$  do obszaru typu  $n$  i elektronów przechodzących z obszaru typu  $n$  do obszaru typu  $p$ . Te dodatkowe nośniki są nazywane **wstrzykniętymi nadmiarowymi nośnikami mniejszościowymi**  $\Delta p$  i  $\Delta n$ . W chwili wprowadzenia przyciągają one nośniki o przeciwnym znaku - większościowe w danym obszarze. Koncentracja nośników nadmiarowych  $\Delta p$  i  $\Delta n$  zmniejsza się zatem wykładniczo w miarę oddalania się od warstwy zaporowej w wyniku rekombinacji z nośnikami większościowymi (rysunek 2c). Wskutek niejednakowej koncentracji wstrzyknięte nośniki mniejszościowe dyfundują do obszarów o mniejszej koncentracji, a więc w kierunku doprowadzeń. Jednocześnie od strony doprowadzeń napływają nowe

nośniki większościowe, wprowadzone dzięki polaryzacji złącza, zapewniające neutralizację ładunku wprowadzonego do poszczególnych obszarów. Prądy unoszenia  $I_{pu}$  oraz  $I_{nu}$  pozostają przy tym praktycznie niezmiennie. W wyniku zwiększenia składowej dyfuzyjnej prądu w obwodzie zewnętrznym płynie prąd równy:

$$I = I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] = I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

$$U_T = \frac{kT}{q}, \quad (6)$$

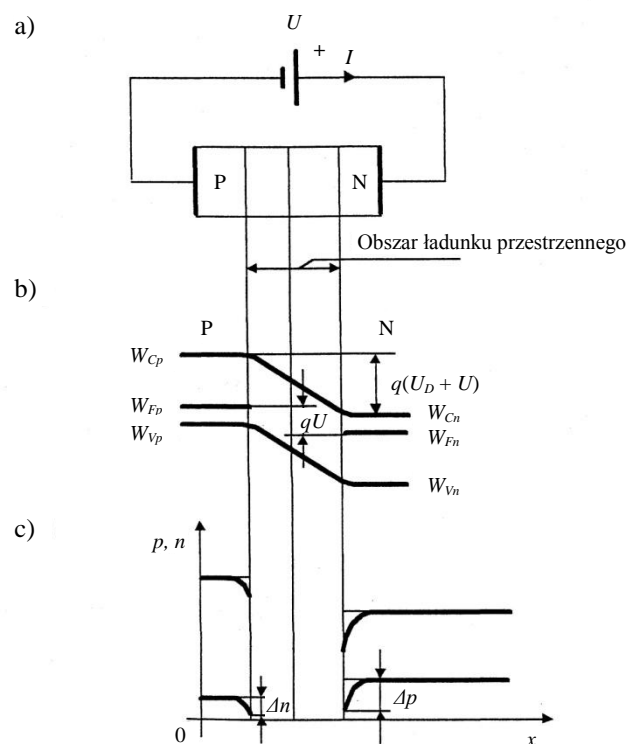
gdzie:  $U_T$  - potencjał termodynamiczny (wynoszący około 26 mV przy  $T = 300$  K),  $I_{sat}$  - prąd nasycenia złącza, zależny od stałych fizycznych, materiałowych oraz konstrukcyjnych złącza.



Rys. 2. Złącze p - n spolaryzowane w kierunku przewodzenia: a) polaryzacja złącza, b) model pasmowy, c) gęstość nośników, d) prądy dyfuzyjne

Przy odwrotnej polaryzacji złącza, zwanej **polaryzacją wsteczną** (rysunek 3a), napięcie zewnętrzne ma kierunek zgodny z kierunkiem napięcia  $U_T$ . Następuje więc dalszy odpływ swobodnych

nośników z obszaru otaczającego warstwę zaporową. Zwiększa się jej szerokość i wzrasta bariera potencjału (rysunek 3b). Zwiększenie bariery potencjału powoduje zmniejszenie dyfuzji nośników, czyli zmniejszenie koncentracji nośników wprowadzanych na drugą stronę złącza (rysunek 3c). Bariera ta nie stanowi przeszkody dla przepływu prądu unoszenia - prądu wstecznego. Jest on jednak niewielki ( $10^{-6} \div 10^{-12}$  A) i bardzo nieznacznie zależy od wartości przyłożonego napięcia, zależy natomiast od temperatury złącza (liczba nośników mniejszościowych) i technologii jego wytwarzania. Zależność prądu  $I$  od napięcia zewnętrznego  $U$  przy polaryzacji wstecznej ujmuje również zależność (5), przy czym przy polaryzacji w kierunku przewodzenia napięcie  $U$  jest dodatnie, natomiast przy polaryzacji wstecznej ujemne.



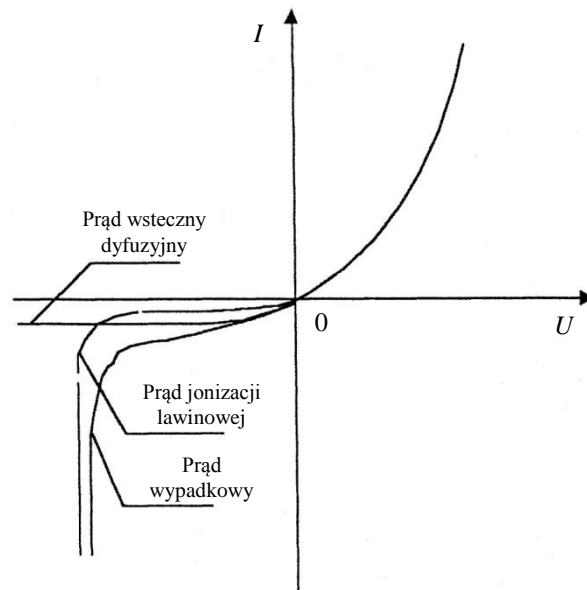
Rys. 3. Złącze p - n spolaryzowane w kierunku wstecznym: a) polaryzacja złącza, b) model pasmowy, c) gęstość nośników

Charakterystyka prądowo - napięciowa złącza ma postać jak na rysunku 4. Przy polaryzacji złącza w kierunku wstecznym, jeżeli obszar ładunku przestrzennego jest szeroki, to nośniki ładunku przechodząc przez ten obszar nabierają dużej energii. Przy odpowiednio dużej wartości napięcia wstecznego poruszające się nośniki zderzają się z węzłami siatki krystalicznej. W wyniku zderzenia energia zostaje przekazana elektronom znajdującym się w węzłach siatki krystalicznej. Elektrony te przechodzą do pasma przewodnictwa, pozostawiając dziury w paśmie walencyjnym. Nośniki te są znowu przyspieszane i mogą wygenerować dalsze. Proces nabiera charakteru **lawinowego**. Na zaciskach zewnętrznych złącza objawia się to gwałtownym zwiększeniem prądu, wskutek

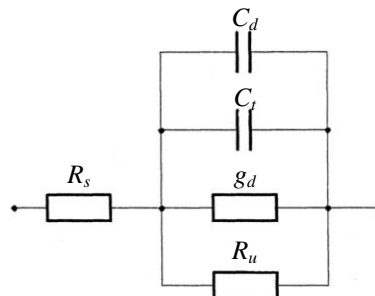
przepływu **prądu jonizacji lawinowej**. Stosunek prądu jonizacji lawinowej do prądu złącza przy małych napięciach wstecznych nazywa się **współczynnikiem powielania**, który określa wzór:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_L}\right)^m}, \quad (7)$$

gdzie:  $m$  - wykładnik zależny od materiału (dla Ge  $m = 3 \div 6$ , dla Si  $m = 2 \div 4$ ),  $U_L$  - napięcie przebicia lawinowego.



Rys. 4. Charakterystyka prądowo - napięciowa złącza p - n



Rys. 5. Schemat zastępczy małosygnałowy złącza p - n

Przy małych sygnałach złącza p - n przyporządkowuje się schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 5. W schemacie tym  $g_d$  oznacza **konduktancję dynamiczną** (różniczkową), wynikającą z nachylenia charakterystyki statycznej. Elementy  $R_u$  i  $R_s$  reprezentują **rezystancję upływu** oraz **rezystancję szeregową** półprzewodnika i doprowadzeń. Wpływ rezystancji  $R_s$  (zwykle rzędu ułamka oma) jest istotny przy pracy w kierunku przewodzenia, zwłaszcza przy dużych prądach, natomiast rezystancji  $R_u$  (rzędu megaomów i więcej) w kierunku wstecznym.

W warunkach dynamicznych, tj. przy szybkich zmianach napięcia doprowadzonego do złącza, oprócz prądu przewodzenia w stanie nieustalonym będzie płynął prąd przesunięcia, związany ze zmianą



ładunku magazynowanego w złączu. Zmiany ładunku spowodowane zmianami napięcia zewnętrznego można interpretować jako pojemności  $C_t$  i  $C_d$ . **Pojemność dyfuzyjna**  $C_d$  odgrywa rolę przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Pojemność  $C_t$  nazywa się **pojemnością złączową** lub **pojemnością warstwy zaporowej**. Wartości obu tych pojemności są funkcjami doprowadzonego napięcia. Zależność pojemności złączowej od napięcia ma postać:

$$C_t = C_0 \left(1 + \frac{U}{U_D}\right)^{-n}, \quad (8)$$

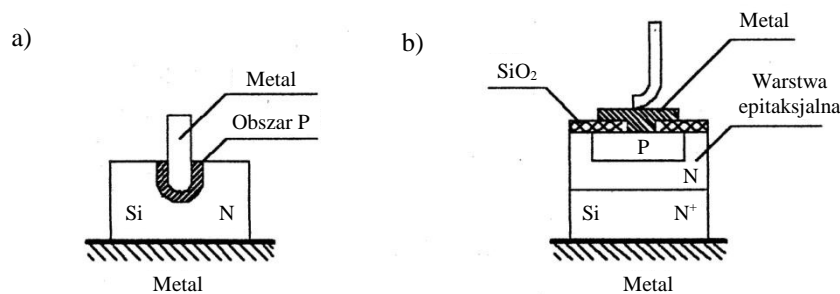
gdzie:  $C_0$  - pojemność przy  $U = 0$ ,  $n$  - wykładnik potęgi (najczęściej  $n = 0,33 \div 0,5$ ),  $U_D$  - napięcie dyfuzyjne (dla złączy z Ge  $U_D = 0,2 \div 0,3$  V, dla złączy z Si  $U_D = 0,6 \div 0,8$  V).

## 2.2. Parametry diod

Złącza p - n stanowią podstawę większości diod półprzewodnikowych. Ze względu na powszechność zastosowania dzieli się je na wiele grup. Dwa podstawowe rodzaje to diody ostrzowe i warstwowe.

Złącze p - n **diody ostrzowej** (rysunek 6a) wykonuje się przez wtopienie elektryczne ostrza metalowego do półprzewodnika typu  $n$ . W procesie zgrzewania pod ostrzem tworzy się mikroobszar typu  $p$ . Na granicy tego obszaru z półprzewodnikiem powstaje złącze p - n. Główną cechą diod ostrzowych jest bardzo mała powierzchnia złącza (rzędu  $10^{-3} \div 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>) i związana z tym nieznaczna pojemność. Dlatego diody ostrzowe można stosować w zakresie wielkich częstotliwości.

**Diody warstwowe** otrzymuje się technologią **stopową** i **dyfuzyjną**, przy czym wykorzystuje się wiele odmian technologii dyfuzyjnej, a zwłaszcza epitaksjalno - planarną.



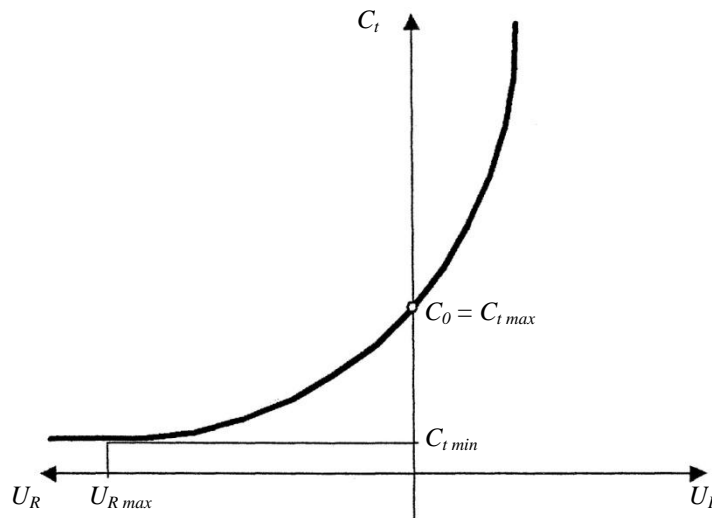
Rys. 6. Budowa diody: a) ostrzowej, b) epitaksjalno - planarnej

W **diodach epitaksjalno - planarnych** (rysunek 6b) na materiale wyjściowym typu  $n^+$ , silnie domieszkowanym, zwanym podłożem, osadza się ciekłą warstwę epitaksjalną o słabszym domieszkowaniu tego samego typu co podłoże. Warstwę epitaksjalną pokrywa się dwutlenkiem krzemu ( $SiO_2$ ). Następnie przez specjalnie przygotowane okno w  $SiO_2$  wprowadza się domieszkę dającą obszar typu  $p$ . Na to nakłada się kontakt metalowy. Z punktu widzenia użytkownika najważniejszy jest **podział diod związany z ich zastosowaniem**. Według tego kryterium wyróżnia

się: diody prostownicze, diody uniwersalne, diody impulsowe, diody stabilizacyjne, diody pojemnościowe, itp.

### 2.3. Dioda pojemnościowa

W diodach pojemnościowych wykorzystuje się zmiany pojemności złącza p - n pod wpływem przyłożonego napięcia. Pracują one zwykle przy polaryzacji w kierunku zaporowym. Mechanizm ten występuje w każdej diodzie półprzewodnikowej, spolaryzowanej w kierunku zaporowym. Jednakże dioda pojemnościowa jest specjalnie przystosowana do tego celu, ponieważ wyróżnia się sposobem domieszkowania półprzewodnika w obszarze złącza p - n, w związku z czym odznacza się odpowiednią koncentracją nośników prądu.



Rys. 7. Charakterystyka diody pojemnościowej

W warstwie zaporowej znajduje się ładunek dipolowy, utworzony przez jony domieszek. Ponieważ wraz ze zmianami napięcia polaryzacji zmienia się szerokość warstwy zaporowej i wartość ładunku nieskompensowanego w tej warstwie, więc stosunek przyrostu ładunku do odpowiadającego mu przyrostu napięcia jest definiowany jako pojemność bariery.

Takie złącze jest podobne do zwykłego naładowanego kondensatora płaskiego. Jak wiadomo, pojemność takiego kondensatora zależy od odległości pomiędzy naładowanymi okładzinami. Przy wzroście napięcia zaporowego obszar złącza rośnie, a więc jego pojemność elektryczna maleje, natomiast przy zmniejszaniu napięcia zaporowego pojemność wzrasta.

Diody pojemnościowe wykorzystuje się w odcinku charakterystyki  $C_t = f(U)$ , ograniczonym pojemnością minimalną  $C_{tmin}$  i pojemnością  $C_{tmax}$  (rysunek 7). Pojemność  $C_{tmin}$  wynika z napięcia przebicia złącza, a pojemność  $C_{tmax}$  jest określona przez wzrost konduktywności dynamicznej diody, która zwiększa się wraz ze wzrostem prądu przewodzenia  $I_F$ .

Dla typowych diod pojemność zmienia się w zakresie od kilkunastu do ponad 100 pF. Dąży się do uzyskania jak największego **współczynnika przestrajania**, określonego wzorem:

$$K_0 = \frac{C_{t \max}}{C_{t \min}} \quad (9)$$

Ważnym parametrem jest również **czułość**, określona wzorem:

$$\alpha = \frac{1}{C_t} \frac{\Delta C_t}{\Delta U} \quad (10)$$

Inne, dość często stosowane w technicznym języku nazwy tych diod to **warikapy** oraz **waraktory**. Warikapy są to diody pojemnościowe przeznaczone do zastosowań jako zmienne pojemności (np. w układach automatycznego przestrajania, powielania i modulacji częstotliwości oraz w układach modulatorów amplitudy). Natomiast waraktory są to diody pojemnościowe przeznaczone do zastosowań jako zmienne reaktancje, spełniające funkcję elementów czynnych w układach parametrycznych (np. wzmacniacze parametryczne lub parametryczne powielacze napięcia).

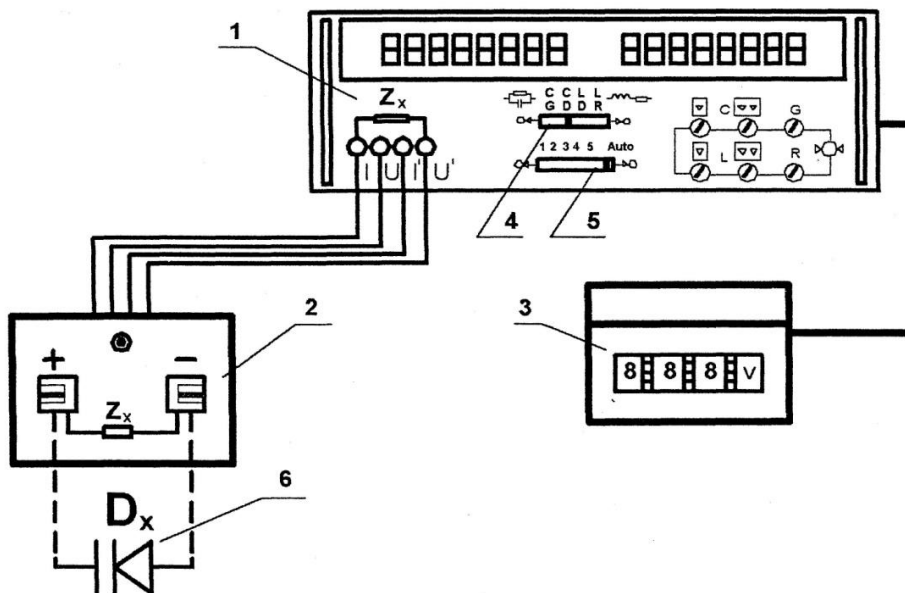
### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych należy:

- wyznaczyć zależności pojemności diody od przyłożonego napięcia,
- porównać pojemności badanych diod,
- obliczyć współczynnik przestrajania oraz czułość diody.

#### 3.1. Pomiary pojemności warikapów w zależności od przyłożonego napięcia

Schemat układu pomiarowego do badań pojemności diod w zależności od przyłożonego napięcia przedstawiony jest na rysunku 8.

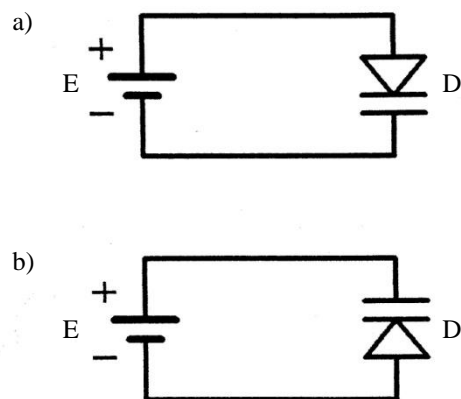


Rys. 8. Schemat stanowiska do przeprowadzania pomiarów charakterystyk napięciowo - pojemnościowych warikapów

Oznaczenia do rysunku 8:

- 1 - mostek cyfrowy E7-12,
- 2 - przystawka do pomiaru czteroprzewodowego,
- 3 - regulator napięcia stałego,
- 4 - przełącznik wartości mierzonej,
- 5 - przełącznik zakresów,
- 6 - uchwyt z badanym warikapem.

Po włączeniu miernika E7-12 i ustawieniu przełącznika **4** w pozycji na pomiar pojemności, oraz po ustawieniu przełącznika **5** w tryb **AUTO** przystępujemy do pomiaru pojemności diod. Pomiary należy przeprowadzić dla każdej z diod. Diody polaryzujemy w kierunku zaporowym tak, jak przedstawia to rysunek 9b.



Rys. 9. Polaryzacja diody: a) w kierunku przewodzenia, b) w kierunku zaporowym

Pomiary wykonujemy zmieniając nastawy napięcia co 0,2 V w zakresie (0 ÷ 3) V oraz co 1 V w zakresie (3 ÷ 30) V. Dla każdej diody wykonujemy jedną serię pomiarów. Wyniki notujemy w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów pojemności w zależności od przyłożonego napięcia

Typ diody:		.....	.....	.....	.....	.....
L.p.	$U, V$	$C_0, \mu F$	$C_0, \mu F$	$C_0, \mu F$	$C_0, \mu F$	$C_0, \mu F$
1.	0,0					
2.	0,2					
3.	0,4					
41.	28,0					
42.	29,0					
43.	30,0					

#### 4. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy umieścić:

- schemat układu pomiarowego,
- tabele z wynikami pomiarów pojemności,
- wykres zależności  $C_0 = f(U)$  dla każdej diody,
- obliczenia czułości oraz współczynników przestrajania diod,
- uwagi i wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

#### 5. PYTANIA KONTROLNE

- Rodzaje diod i ich zastosowanie.
- Budowa i zasada działania warikapów.
- Wyjaśnić pojęcie współczynnika przestrajania.
- Zastosowanie diod pojemnościowych.

#### 6. LITERATURA

- Braclawski K., Maciak J., Sadowski K.: *Laboratorium przyrządów półprzewodnikowych. Diody półprzewodnikowe*. Warszawa, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 1999.
- Waczyński K., Wróbel E.: *Przyrządy półprzewodnikowe. Część 1. Podstawy działania diod i tranzystorów - zadania*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 1998.
- Chwaleba A., Moshchke B.: *Elektronika*. Warszawa, WSiP 1999.