

**WYDZIAŁ FIZYKI, MATEMATYKI I INFORMATYKI
POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ**

Instytut Fizyki
**LABORATORIUM PODSTAW ELEKTROTECHNIKI,
ELEKTRONIKI I MIERNICTWA**

ĆWICZENIE 7 *Pojemność złącza p-n*

POJĘCIA I MODELE potrzebne do zrozumienia działania złącza p-n i poprawnego wykonania pomiarów pojemności złącza zależnej od stopnia jego polaryzacji w kierunku zaporowym:

1. Półprzewodnik typu n oraz p
2. Formowanie złącza p-n
3. Powstawanie równowagowego rozkładu ładunku i bariery potencjału elektrycznego na styku p-n
4. Polaryzacja złącza w kierunkach: zaporowym i przewodzenia
5. Wpływ wartości napięcia polaryzującego złącze p-n w kierunku zaporowym na pojemność efektywną złącza.
6. Wpływ zmiany pojemności w obwodzie rezonansowym na wartość jego częstotliwości rezonansowej.
7. Budowa i działanie diody i diody pojemnościowej

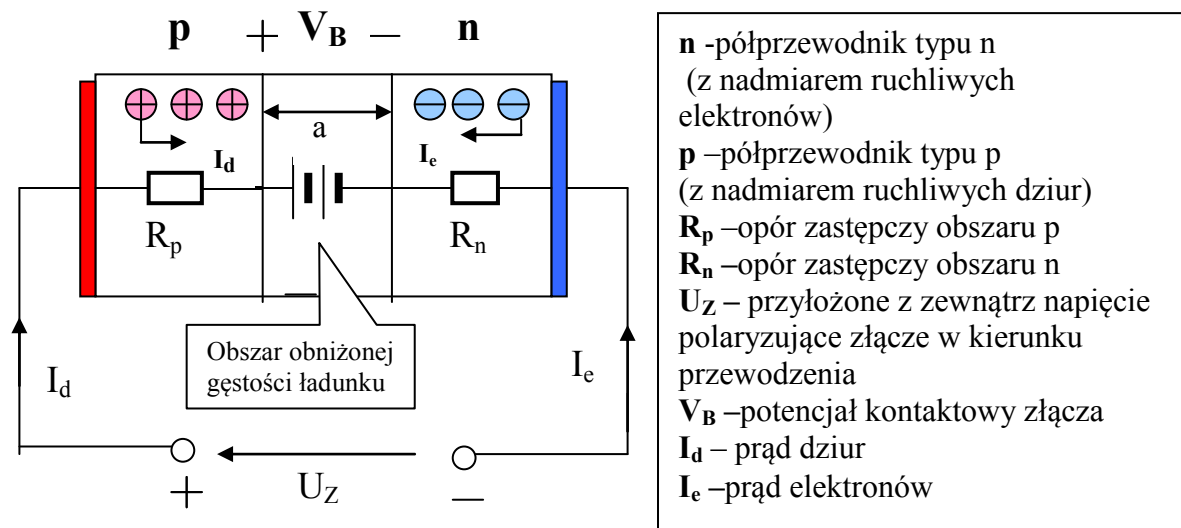
Literatura:

1. M. Polowczyk „Elementy i przyrządy półprzewodnikowe powszechnego zastosowania „ WkiŁ, Warszawa 1986
2. W. Marciniak „, Przyrządy i układy scalone „, WNT, Warszawa 1987
3. N. Lurch „, Podstawy techniki elektronicznej” WNT, Warszawa 1974

Autor: Franciszek Starzyk

1. Wprowadzenie

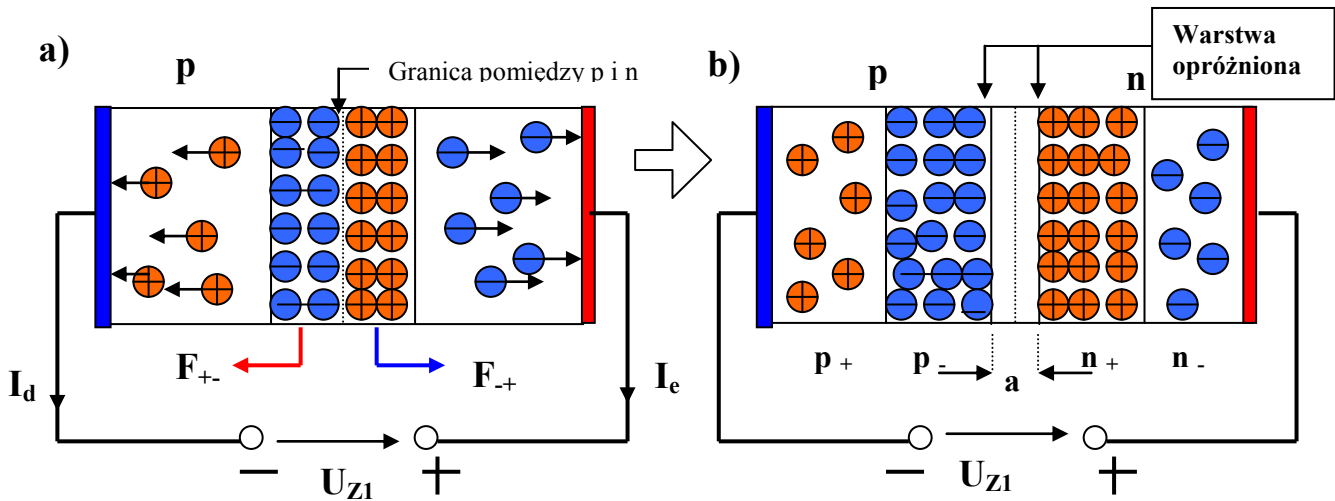
Złącze p-n – opis powstawania bariery potencjału na złączu przedstawiono w instrukcji do ćwiczenia nr.1 (Sporządzanie charakterystyk tranzystora). Tutaj przedstawimy schemat zastępczy złącza (rys.1)



Rys.1. Schemat zastępczy złącza p – n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia , prąd w obwodzie zewnętrznym ($I = I_d + I_e$) płynie jeżeli $U_Z > V_B$.

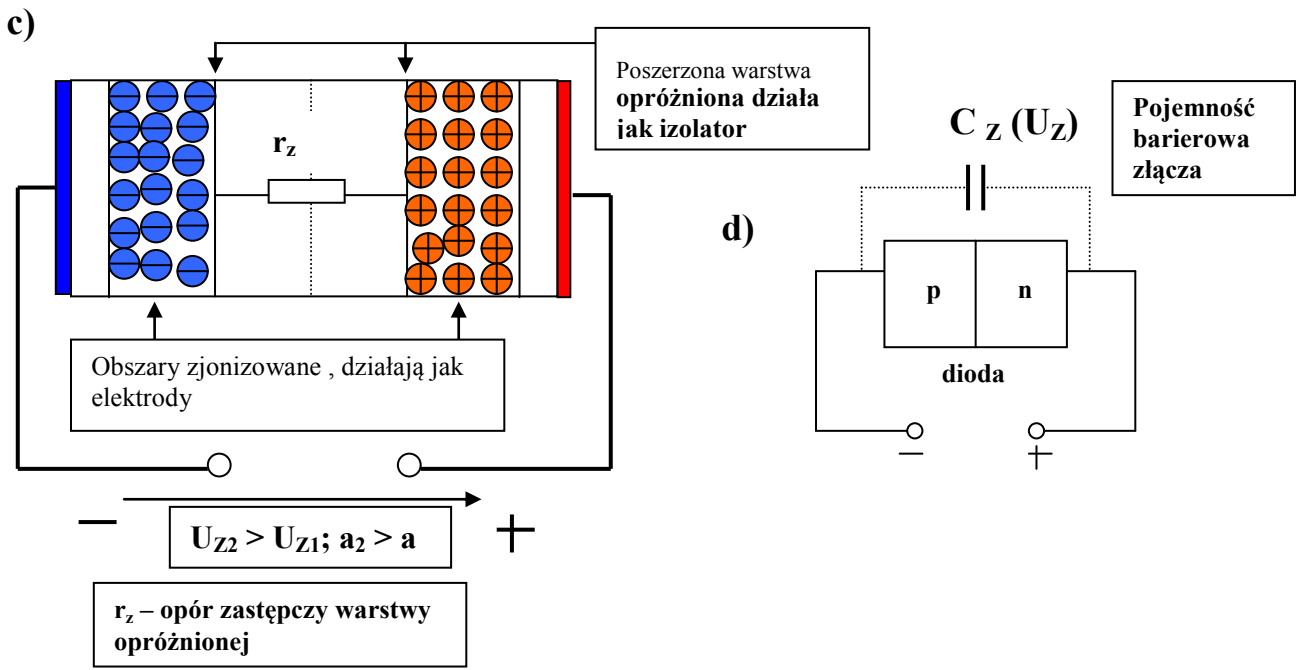
Wartość V_B zależy od rodzaju półprzewodników p i n (od średniej gęstości dziur w półprzewodniku p oraz elektronów w n) jak i od struktury fizycznej złącza. O szczegółach struktury złącza decyduje technologia czyli sposób jego wykonania. Obszar obniżonej gęstości ładunku to obszar w którym występuje duże natężenie pola elektrycznego. Stanowi on obszar przejściowy pomiędzy objętościami o przeciwnych typach przewodnictwa. Określa się go również jako **warstwę opróżnioną**.

Z doświadczenia wiadomo , że gdy zmienić kierunek przyłożonego z zewnątrz napięcia U_Z (polaryzacja w kierunku zaporowym) to można zwiększyć szerokość warstwy opróżnionej. Na rys.2 przedstawiono jak przebiega



Stan przejściowy tuż po przyłożeniu U_Z , brak równowagi – działają nie skompensowane siły oddziaływujących rozkładów ładunków.

Prądy I_d oraz I_e zanikają, ustala się równowaga oddziaływań wszystkich 4 warstw ładunków w obecności zewnętrznego nap. U_{Z1} . Pojawia się znaczna warstwa opróżniona o szerokości a



Rys.2. Mechanizm powstawania rozkładu ładunków w złączu p – n spolaryzowanym zaporowo oraz poszerzania warstwy opróżnionej, czyli zmniejszania się zastępczej pojemności złącza ze wzrostem napięcia polaryzującego U_Z .

poszerzanie szerokości warstwy opróżnionej po przyłożeniu napięcia U_Z w kierunku zaporowym.

Po przyłożeniu U_Z (rys.2a) część swobodnych dziur z obszaru p , oraz swobodnych elektronów z obszaru n , zostaje odciągnięta w kierunku elektrod. Płyną przejściowo prądy I_d oraz I_e . Odpływające dziury oraz elektrony oddziałują na obszar graniczny w którym zwiększają się ładunki p. i n₊ . Są to obszary zjonizowanych sieci półprzewodników p raz n . Prądy przepolaryzownia I_d oraz I_e płyną aż do chwili ustalenia się nowego stanu równowagi , wymuszonego zmienioną wartością napięcia U_{Z1} (rys.2b). Będzie to równowaga dynamiczna w układzie czterech rozkładów nie skompensowanych ładunków p₊ , p. , n₊ , n. , w obecności pola elektrycznego wytworzonego przez przyłożone napięcie U_{Z1} . Jest to równowaga w oddziaływaniu typu „każdy z każdym” i opisana może być jedynie statystycznie. Pojawia się wyraźna warstwa opróżniona z ładunków o szerokości a, która odgrywa rolę *izolatora* . Rośnie opór złącza w kierunku zaporowym. Dalsze zwiększanie U_Z powoduje poszerzanie warstwy opróżnionej . Całe złącze p-n , spolaryzowane zaporowo, widziane z zacisków zewnętrznych. Zachowuje się tak jak zależna od napięcia pojemność $C_Z(U_Z)$.

Zwiększenie odległości pomiędzy okładkami kondensatora płaskiego powoduje zmniejszenie jego pojemności elektrycznej. Podobnie zachowuje się zastępcza pojemność złącza p-n spolaryzowanego zaporowo: maleje ze wzrostem napięcia polaryzującego. Zjawisko to wykorzystano do budowy diod pojemnościowych zwanych warikapami (voltage – variable capacitors).

2. *Diody pojemnościowe*

Diody pojemnościowe (dp) to złącza p-n ale konstruowane tak aby można było wykorzystać w praktyce pojemność barierową jako kondensator o pojemności zależnej od przyłożonego w kierunku zaporowym napięcia.

Wykonywane są one z krzemu, germanu i arsenku galu jako warikapów oraz waraktory.

Warikapów przeznaczonych są do pracy w obwodach rezonansowych generatorów jako pojemności przestrajające pod wpływem napięcia ich częstotliwości rezonansowe czyli częstotliwości generowanych sygnałów. Pracują one w zakresach częstotliwości małych i średnich aż do ok. 10^8 Hz.

Waraktory konstruowane są do pracy w zakresie wysokich częstotliwości aż do ok. 10^{10} Hz.

Najważniejszą charakterystyką diody pojemnościowej jest zależność jej pojemności barierowej od napięcia polaryzacji w kierunku zaporowym. Dość często można tę zależność opisać przybliżoną formułą:

$$C_Z \cong C_{Z0} \left(\frac{V_B}{V_B + U_{ZU}} \right)^m \quad (1)$$

gdzie: V_B – napięcie bariery dla $U_Z = 0$

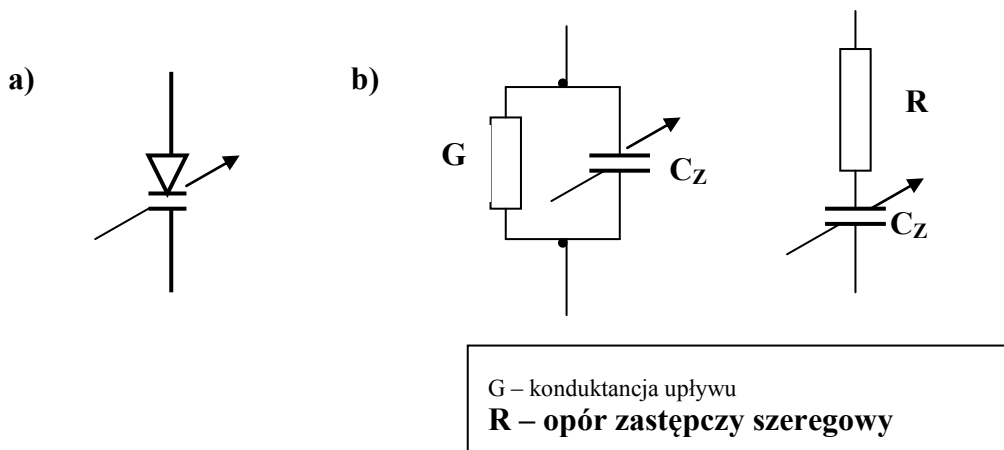
U_Z - napięcie polaryzacji zaporowej

m - stała zależna od sposobu wykonania złącza (jego struktury fizycznej)

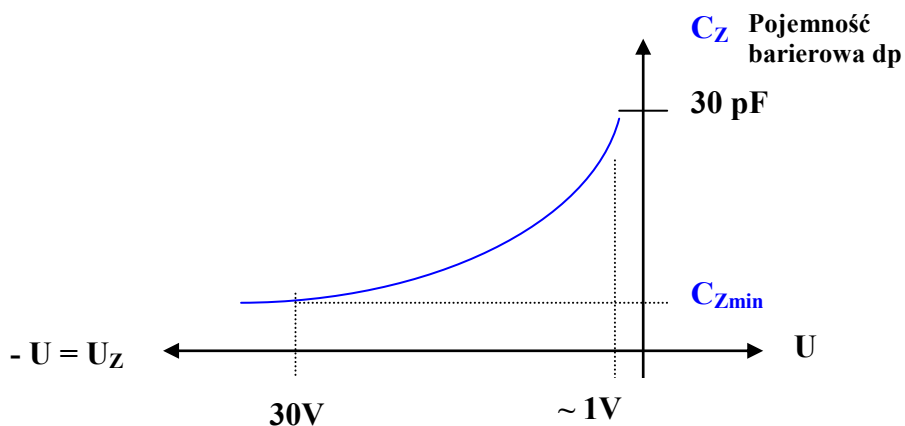
C_{Z0} – pojemność diody dla $U_Z = 0$

Praktyczny początek napięć $U_Z \approx 0.25$ V i zależy od typu i wykonania diody.

Przy małych napięciach mechanizm formowania warstwy opróżnionej może zależeć nieliniowo od napięcia i dlatego należy ten zakres odrzucić w zastosowaniach. Pojemności warikapów mogą się zmieniać od ok. 30 pF do ok. 2 pF. Inne mogą pracować jedynie przy małych napięciach. Na rys.3 przedstawiono symbol układowy diody pojemnościowej a), oraz niektóre ich układy zastępcze b). Typową charakterystykę pojemnościowo – napięciową dp pokazano na rys.4 .



Rys.3. Dioda pojemnościowa a) symbol , b) niektóre układy zastępcze

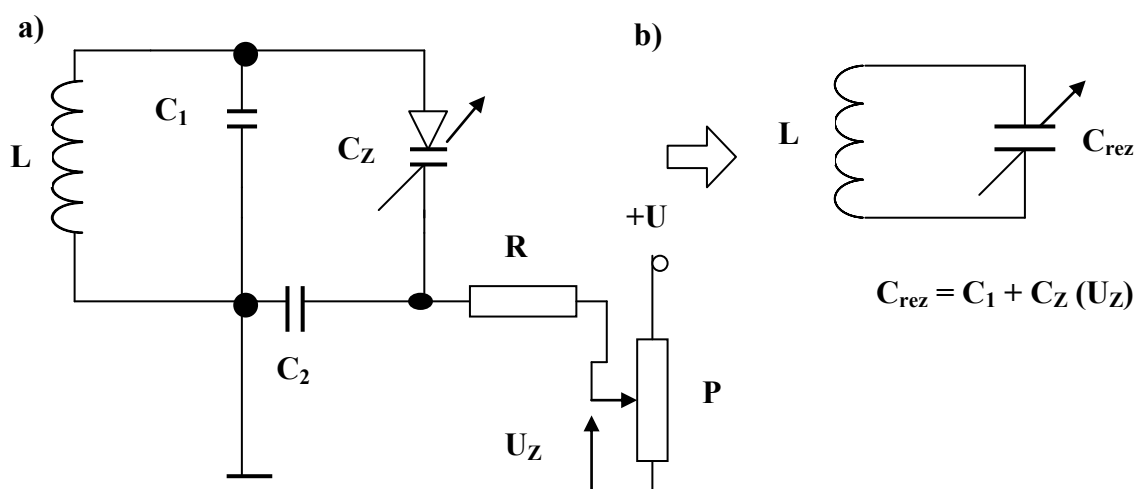


Rys.4. Charakterystyka pojemnościowo – napięciowa diody pojemnościowej

3. *Dioda pojemnościowa jako element obwodu rezonansowego LC.*

Przykład obwodu rezonansowego LC (patrz również ćwiczenie rezonans w obwodach RLC) o częstotliwości rezonansowej przestrajanej napięciem przyłożonym do dp widzimy na rys.5a .

Część napięcia U zbierana jest z potencjometru P jako U_z i przykładana do dp. Przy założeniu , że $C_2 \gg C_1$ częstotliwość rezonansowa obwodu może być przybliżona wzorem:



Rys.5. a) przestrajany napięciem U_Z obwód rezonansowy z dp, b) schemat zastępczy obwodu a)

$$f_{rez} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_Z)}} \quad ; \quad C_Z = C_Z(U_Z) \quad (2)$$

Przy znanej wartości indukcyjności cewki L , mierząc f_{rez} można wyznaczyć C_{Z0} gdy $U_Z = 0$, oraz ciąg wartości $C_{Zj}(U_{Zj})$ przykładając znane (mierzone dobrym woltomierzem) napięcia U_{Zj} oraz mierząc odpowiadające im wartości f_{rezj} dla $j = 1$ do np. 10 (11 punktów pomiarowych łącznie).

Aby uprościć powyższe pomiary skonstruowano specjalny generator pomiarowy w którym obwód rezonansowy, zawierający przestrajaną napięciem dp, jest elementem obwodu sprzężenia zwrotnego wzmacniacza tranzystorowego co czyni ten układ generatorem sygnału o częstotliwości rezonansowej f_{rez} . Schemat tego generatora, przeznaczonego do pomiarów pojemności barierowej diod (w tym również dp), przedstawiono na rys.6.

4. *Pomiar pojemności barierowej.*

4.1. Nie podłączając niczego do sieci zmontować układ pomiarowy wedle schematu przedstawionego na rys.7 .

4.2. Pomiar pojemności C_1 oraz indukcyjności L obwodu rezonansowego generatora pomiarowego.

Pojemność zastępcza obwodu rezonansowego (rys.5.b) dwie składowe : C_1 – reprezentującą efektywną pojemność tego obwodu gdy do zacisków A-B nic nie jest podłączone, jako drugą składową możemy podłączyć do A-B znaną pojemność wzorcową C_{W1} i zmierzyć częstotliwość rezonansową f_{r1} ; wyniesie ona:

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_{W1})}} \quad (3)$$

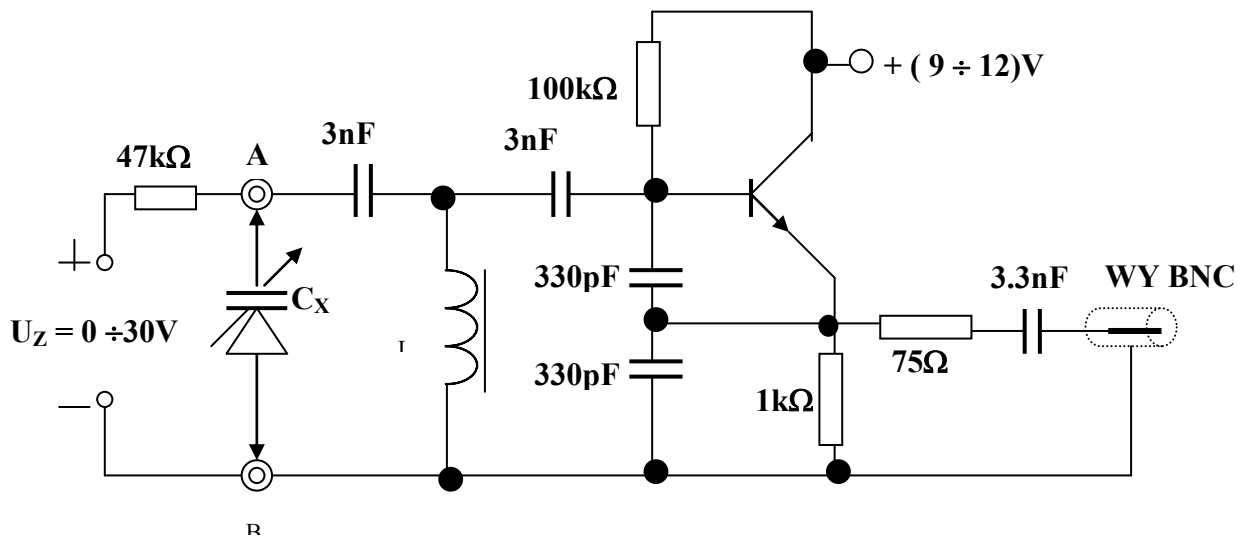
4.3. Włączyć C_{W1} o znanej pojemności do zacisków A-B (C_x) i zmierzyć $f_{r1}(C_{W1})$

4.4. Wyjąć C_{W1} i jej miejsce podłączyć wskazaną przez prowadzącego C_{W2} również o znanej pojemności. Zmierzyć f_{r2} . Będzie ona określona jako:

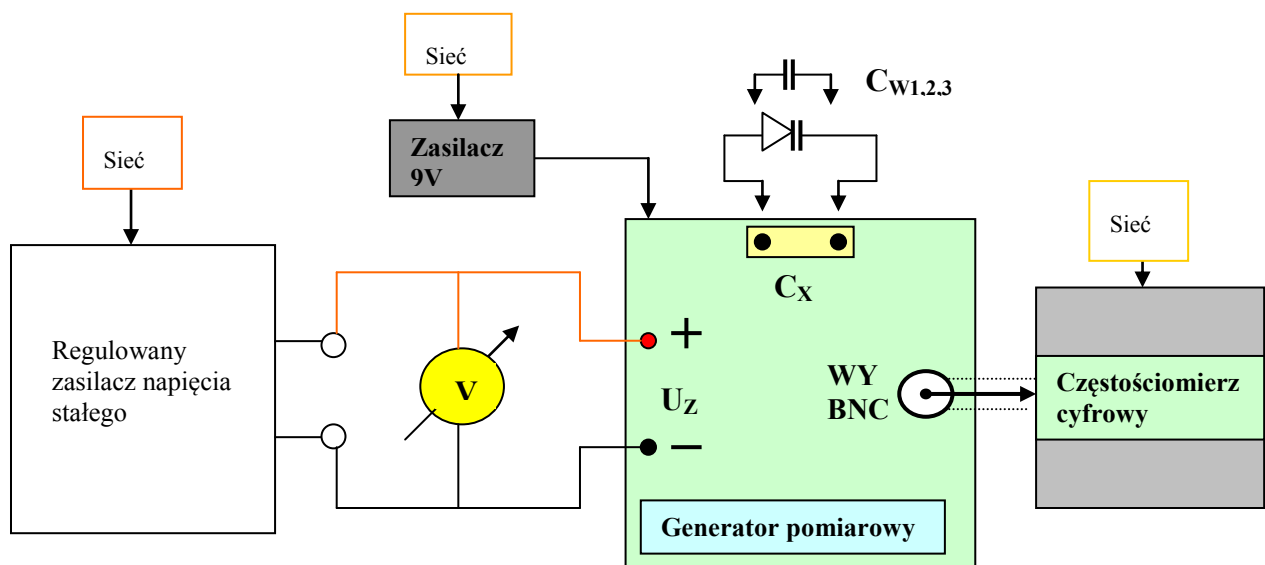
$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_{W2})}} \quad (4)$$

4.5. Po rozwiązaniu układu równań (2) i (3), obliczyć C_1 oraz L korzystając z:

$$C_1 \cong \frac{C_{W2} - \left(\frac{f_{r1}}{f_{r2}}\right)^2 C_{W1}}{\left(\frac{f_{r1}}{f_{r2}}\right)^2 - 1} ; \quad L \cong \frac{1}{4\pi^2 f_{r1}^2 (C_1 + C_{W1})} \quad (5)$$



Rys.6. Schemat generatora do pomiaru pojemności barierowej złącza p - n



Rys.7. Schemat połączeń układu do pomiaru pojemności złącz p – n metodą rezonansową

4.6. Dla porównania, podłączyć w miejsce C_{W2} , znaną również pojemność C_{W3} i zmierzyć f_{r3} .

4.7. Używając kombinacji zgromadzonych danych ($C_{W1}; f_{r1}$) i ($C_{W3}; f_{r3}$) oraz ($C_{W2}; f_{r2}$) i ($C_{W3}; f_{r3}$) obliczyć ponownie C_1 oraz L . Ocenic rozrzut wartości C_1 oraz L a do dalszych obliczeń użyć średnich.

4.8. **Pomiar zależności pojemności barierowej wybranych diod od napięcia.**

W miejsce C_X (rys.7), podłączyć wskazaną przez prowadzącego diodę. Dla napięcia $U_Z = 0$ zmierzyć f_{r0} . Następnie zwiększając napięcie U_Z (regulowany zasilacz napięcia stałego, rys.7) w przedziale od ok. 0.5V do ok. 30V co ok. 2V, zależnie od rodzaju diody wybranej do pomiarów, zmierzyć częstotliwości rezonansowe f_{rj} odpowiadające ustawianym napięciom U_{Zj} . Wartości U_Z odczytywać z multimetru V (rys.7). Wyniki można zapisać w tabeli umieszczonej na końcu instrukcji (załącznik). Szukane wartości C_{Zj} obliczyć ze wzoru:

$$C_{Zj} \cong \frac{1}{4\pi^2 f_{rj}^2 L} - C_1 \quad (6)$$

Do obliczeń użyć średnich wartości C_1 oraz L a wszystkie wartości podstawiać w jednostkach układu SI.

4.9. Sporządzić wykres zależności $C_{Zj} = C_{Zj}(U_{Zj})$ dla badanej diody i porównać go z danymi zawartymi w załączniku do niniejszej instrukcji. Określić zakres użytecznych napięć do modulacji pojemności barierowej badanej diody.

Jeżeli pojemność barierowa badanej diody malała ze wzrostem napięcia U_Z w przybliżeniu wykładniczo (w zakresie użytecznym), to sporządzić wykres zależności $\log C_{Zj} = f(\log U_Z)$ i wyznaczyć jego nachylenie. Przyrównać jego wartość do m , wzór (1), i spróbować określić V_B oraz dopasować formułę (1) do zmierzonego przebiegu. Można użyć dowolnego programu graficznego. Podać współczynnik korelacji dopasowania, obliczony w programie.

5.0. Powtórzyć czynności opisane w punktach 4.8. i 4.9. dla drugiej diody wskazanej przez prowadzącego.

Załącznik: Tabela pomiarów i obliczeń

Pomiar zależności częstotliwości rezonansowej generatora pomiarowego, zawierającego obwód rezonansowy złożony z indukcyjności L oraz pojemności zastępczej złącza badanej diody C_Z , która maleje ze wzrostem wartości napięcia polaryzującego to złącze w kierunku zaporowym

STAŁE: $L = \dots$ [H], $C_1 = \dots$ [F], typ diody:.....

Lp.	U_Z [V]	f_r [MHz]	C_Z [pF]
1	0		
2	0.5 ^{*)}		
3	0.7		
4	0.9		
5	1.2		
6	2		
7	4		
8	6		
9	8		
10	10		
11	12		
12	14		
13	16		
14	18		
15	20		

^{*)} wartości przykładowe

Uwaga: obliczenia wartości C_Z ze wzoru (6) należy wykonać podstawiając wartości C_1 w [F], wartości L w [H] a wartości f_r w [Hz].

Wersję pierwotną tego ćwiczenia opracował K.Frankiewicz a konstrukcję generatora pomiarowego opracował i wykonał J.Kopczyński