



## Elektronika przyrządów półprzewodnikowych

### Laboratorium nr 5 Diody pojemnościowe

#### Zagadnienia obowiązujące na kartkówce

- Symbol, zasada polaryzacji, charakterystyka I-U, parametry złącza p-n, mechanizmy transportu nośników ładunku, składowe prądy, mechanizm powstawiania złącza p-n.
- Rozkład koncentracji domieszek w złączu liniowym i skokowym oraz diodzie pojemnościowej (hiperskokowej).
- Reaktancja elementów biernych (cewki indukcyjnej oraz kondensatora).
- Szeregowy oraz równoległy obwód rezonansowy RLC – schemat, warunek rezonansu, częstotliwość rezonansowa, rodzaj rezonansu (rezonans napięć czy rezonans prądów – opis + wyjaśnienie).
- Zależność pojemności złączonej od napięcia polaryzacji złącza p-n (wykres + wzór + komentarz dla standardowych złączy p-n (liniowe/skokowe) oraz hiperskokowego).
- Diody pojemnościowe – warikapy i waraktory.
- Zadania obliczeniowe związane z programem ćwiczenia.

#### Literatura

- T. Ohly, Z. Radzimski, *Elementy elektroniczne cz. I*, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1980, podrozdział 3.1.3. Pojemności złącza p-n,
- W. Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WNT, Warszawa 1987, podrozdział 3.1.7. Modele złącza p-n (sekcje: pojemność warstwy zaporowej oraz pojemność dyfuzyjna), podrozdział 4.5. Diody pojemnościowe,
- B. Wilamowski, *Mikroelektronika: Specjalne przyrządy półprzewodnikowe*, podrozdział 2.2.6. Warikapy złączowe.

#### IV. Wiadomości wstępne

Każde złącze półprzewodnikowe posiada dwie składowe pojemności: złączową i dyfuzyjną. W interpretacji modelu pasmowego ciała stałego, między obszarami materiału półprzewodnikowego o różnym typie przewodnictwa (złącze p-n), znajduje się tzw. warstwa zubożona (inaczej: obszar ładunku przestrzennego lub warstwa zaporowa). Podstawową cechą tego obszaru jest brak w nim swobodnych elektronów i dziur, czyli ruchomych nośników ładunku elektrycznego. Jest to efekt działania wbudowanego, wewnętrznego pola elektrycznego powodowanego napięciem dyfuzyjnym  $U_{dyf}$ . Napięcie to nazywane jest również napięciem wbudowanym  $U_{bi}$  (ang. *built in*). W opisywanym obszarze, po stronie materiału półprzewodnikowego typu n, pozostają nieruchome, dodatnio zjonizowane domieszki donorowe, znajdujące się w węzłach sieci krystalicznej. Analogicznie po stronie materiału półprzewodnikowego typu p pozostają ujemnie zjonizowane domieszki akceptorowe. Istnieje zatem w złączu p-n dipol ładunku przestrzennego, rozciągający się na szerokość grubości warstwy zaporowej. Grubość warstwy zubożonej jest wprost proporcjonalna do wartości napięcia polaryzacji złącza w kierunku zaporowym, a prąd płynący dla tej polaryzacji jest prądem unoszenia nośników mniejszościowych i posiada bardzo małe natężenie. Można zatem stwierdzić, że opisywana sytuacja odpowiada kondensatorowi płaskiemu o zmiennej grubości dielektryka. Może budzić wątpliwość fakt, że w miarę wzrostu napięcia w kierunku zaporowym „odślaniane” są coraz to nowe zjonizowane atomy domieszki, czyli sumaryczny ładunek dipola zwiększa się, zatem pojemność także powinna się zwiększać. Dokładna analiza wykazuje jednak, że dominującym czynnikiem jest wzrost grubości warstwy zaporowej i w efekcie pojemność kondensatora maleje nieliniowo.

Wychodząc z definicji pojemności płaskiego kondensatora można wykazać, że w przypadku złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym pojemność złączowa  $C_j$  wyraża się wzorem:

$$C_j = \frac{C_0}{\left(1 - \frac{U_{pol}}{U_{dyf}}\right)^m} \quad (1)$$

gdzie:

$C_0$  - pojemność złącza przy zerowej polaryzacji ( $U_{pol} = 0$  V),

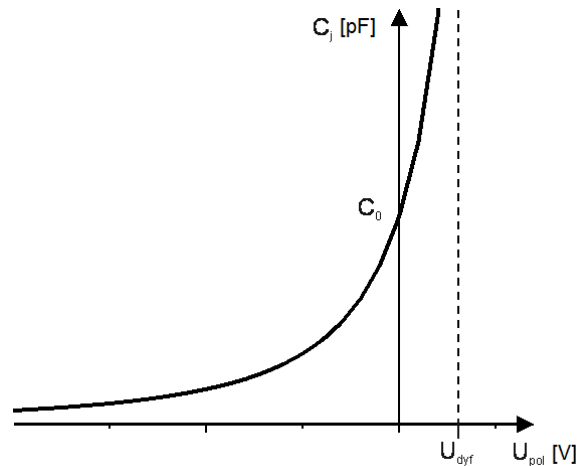
$U_{pol}$  - napięcie polaryzacji w kierunku zaporowym (uwaga: wartość ujemna),

$U_{dyf}$  - napięcie dyfuzyjne, potencjał bariery dyfuzyjnej złącza (napięcie wbudowane),

$m$  - wykładnik, zależny od rozkładu koncentracji atomów domieszki.

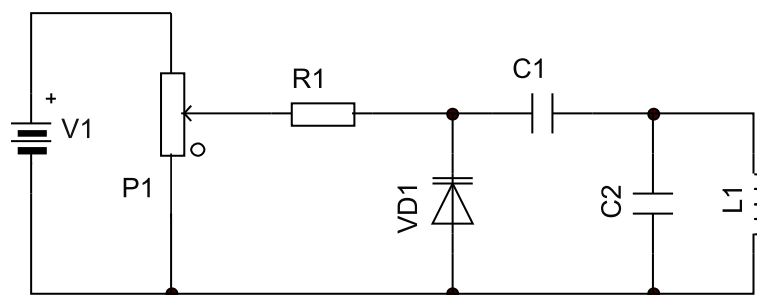
Wartość  $m = 1/2$  świadczy o tym, że rozkład koncentracji domieszki ma charakter skokowy, czyli złącze wykonano technologią stopową lub przy pomocy płytkiej implantacji. Wartość  $m = 1/3$  oznacza, że rozkład koncentracji domieszki ma rozkład zbliżony do liniowego, a złącze zostało wykonane np. technologią dyfuzyjną.

Na rys. 1. przedstawiono zmianę pojemności złączowej w funkcji napięcia polaryzacji.



Rys. 1. Zależność pojemności złączowej  $C_j$  od napięcia polaryzacji  $U_{pol}$

Ze względu na możliwość zmiany pojemności diody półprzewodnikowej za pomocą napięcia polaryzacji, są one wykorzystywane w przestrajalnych obwodach rezonansowych. Przykładowy schemat równoległego obwodu rezonansowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zastosowanie diody półprzewodnikowej jako elementu przestrajającego obwód rezonansowy  $L1-C2$

W przypadku ogólnym częstotliwość obwodu rezonansowego wyraża się wzorem:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{rez} * C_{rez}}} \quad (2)$$

Dla powyższego układ pojemność  $C_{rez}$  składają się z pojemności kondensatorów C1, C2 oraz pojemności złączonej diody VD1.

W praktyce okazuje się, że zastosowanie diod z klasycznymi złączami skokowymi lub liniowymi nie jest zbyt wygodne. Najbardziej pożądanym byłoby, aby częstotliwość obwodu rezonansowego zmieniała się liniowo wraz z napięciem przestrajania. Łatwo można wykazać, że wymóg ten spełniony jest, gdy wartość wykładnika  $m$  wynosi 2. Sterując odpowiednio domieszkowaniem w procesie wytwarzania diod, możliwe jest uzyskanie pożądanego rozkładu koncentracji domieszek w złączu p-n, a w ten sposób kształtowanie charakterystyki C-V diody pojemnościowej.

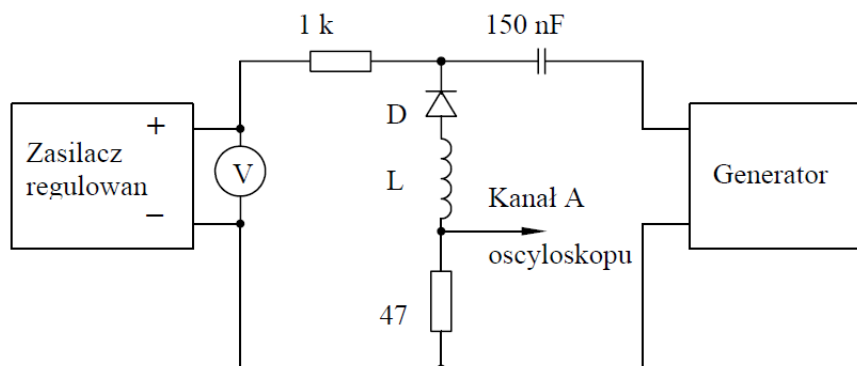
W dziedzinie diod pojemnościowych obecnie można spotkać określenia komercyjne takie jak: *abrupt*, *hyper abrupt*, *superhyper abrupt* (termin *abrupt* w j. angielskim oznacza złącze skokowe). Nazwy te odnoszą się przede wszystkim do zakresu zmian wartości pojemności w funkcji napięcia. Względne zmiany  $C_{max}/C_{min}$  pojemności wynoszą odpowiednio:

- 4:1 dla złącza skokowego (*abrupt*),
- 10:1 dla złącz określanych jako *hyper abrupt*,
- 20:1 dla złącz określanych jako *superhyper abrupt*.

Należy pamiętać, że charakterystyka  $C_T = f(U)$  złącz *hyper abrupt* oraz *superhyper abrupt* nie jest określona zależnością funkcyjną (1), uwzględniającą standardową technologię wykonania złącza p-n.

## V. Program ćwiczenia

Pomiary pojemności złącza p-n przeprowadzić w układzie szeregowego układu RLC, którego schemat przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układ do pomiaru pojemności złącza  $C_T = f(U)$

### Przebieg pomiaru:

- ustawić sygnał sinusoidalny generatora:  $U_{pp} = 100 \text{ mV}$ , częstotliwość (wstępnie)  $1 \text{ MHz}$ ,
  - diodę spolaryzować napięciem stałym w przedziale:  $U_{RM} < U < -0,5 \text{ V}$  (np.  $U = -1 \text{ V}$ )
  - zmieniając częstotliwość sygnału generatora znaleźć częstotliwość rezonansową układu  $f_r$ ,
  - powtórzyć pomiar dla kilku napięć polaryzacji zaporowej (np.  $-2 \text{ V}$ ,  $-3 \text{ V}$ ,  $-5 \text{ V}$ ,  $-10 \text{ V}$ ,  $-20 \text{ V}$ )
- W rezonansie wystąpi maksimum amplitudy napięcia mierzonego oscyloskopem na rezystorze.

Dla każdego punktu pomiarowego obliczyć pojemność diody, przekształcając wzór na częstotliwość rezonansową (2), przyjmując wartość indukcyjności cewki  $L = 78,8 \mu\text{H}$ . W tym wypadku  $C_{rez}$  we wzorze (2) stanowi pojemność złączową ( $C_T$ ) mierzonej diody.

### Prezentacja i analiza wyników pomiarów:

- wykreślić charakterystyki  $C_T = f(U)$  zmierzonych diod w liniowym układzie współrzędnych oraz w układzie współrzędnych log-log,
- obliczyć parametry  $C_0$  oraz  $m$ , korzystając z zależności (1),
- obliczyć współczynnik zmian pojemności zmierzonych diod od polaryzacji  $k = C_{T(-2 \text{ V}/-20 \text{ V})}$ ,
- porównać otrzymane wyniki z danymi zawartymi w tabeli 1.

Podpowiedź: w celu obliczenia parametrów równania (1) można wykreślić wykres  $C_T = f(1-U/U_D)$  we współrzędnych log-log (można skorzystać z arkusza kalkulacyjnego, np. w programie Origin) i skorzystać z faktu, że po zlogarytmowaniu równania otrzymujemy równanie prostej:

$$\begin{aligned} \log C_T &= -m \cdot \log \left( 1 + \frac{U}{U_D} \right) + \log C_0 \\ y &= a \cdot x + b \end{aligned}$$

Druga metoda obliczeń parametrów równania polega na rozpisaniu układu równań dla dwóch punktów pomiarowych:

$$\begin{cases} \log C_{T_1} = -m \cdot \log \left( 1 + \frac{U_1}{U_D} \right) + \log C_0 \\ \log C_{T_2} = -m \cdot \log \left( 1 + \frac{U_2}{U_D} \right) + \log C_0 \end{cases}$$

Układ równań należy tak przekształcić, aby otrzymać wzór na wartość wykładnika  $m$ , a następnie wstawić dane pomiarowe i wykonać obliczenia.

*Tabela 1. Przykładowe parametry katalogowe wybranych diod pojemnościowych*

	$U_{RM}$ [V]	$I_{AV}$ [mA]	C [pF]	$U_R$ [V]
BB104G	30	100	40-14	3-30
BB105G	28	20	17,5-2,1	1-25
BB109B	28	20	29-5,1	3-25
BB110G	30	100	29-11	3-30
BB113	30	50	255-13	1-30