

23 kwietnia 2001

Ryszard Kostecki

Badanie własności diód
krzemowej, germanowej,
oraz diody Zenera

Streszczenie

Celem tej pracy jest zapoznanie się z tematyką i zbadanie diód krzemowej, germanowej, oraz diody Zenera, wyznaczenie ich charakterystyk, porównanie z charakterystykami teoretycznymi, wyznaczenie napięcia przewodzenia, oraz czasu trwania impulsu prądu wstecznego.

Oznaczenia

k - stała Boltzmanna, $k = 8,617342 \cdot 10e-5$ eV/K

e - ładunek elementarny

T - temperatura pracy diody

M - współczynnik związany z typem półprzewodnika, określa napięcie przewodzenia (U_p) złącza danego rodzaju. Przybliżone wartości M wynoszą dla złącz: krzemowych - 0.65, germanowych - 0.35, arsenkowo-galowych - 2,3.

I_g - prąd generacji

U_{we} - napięcie wejściowe

U_{wy} - napięcie wyjściowe

U_p - napięcie przewodzenia

t_p - czas trwania impulsu prądu wstecznego

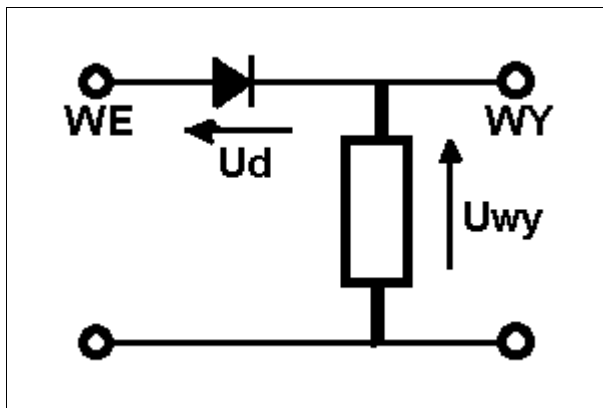
log - oznaczać będzie logarytm naturalny (a nie dziesiętny!)

Realizacja techniczna

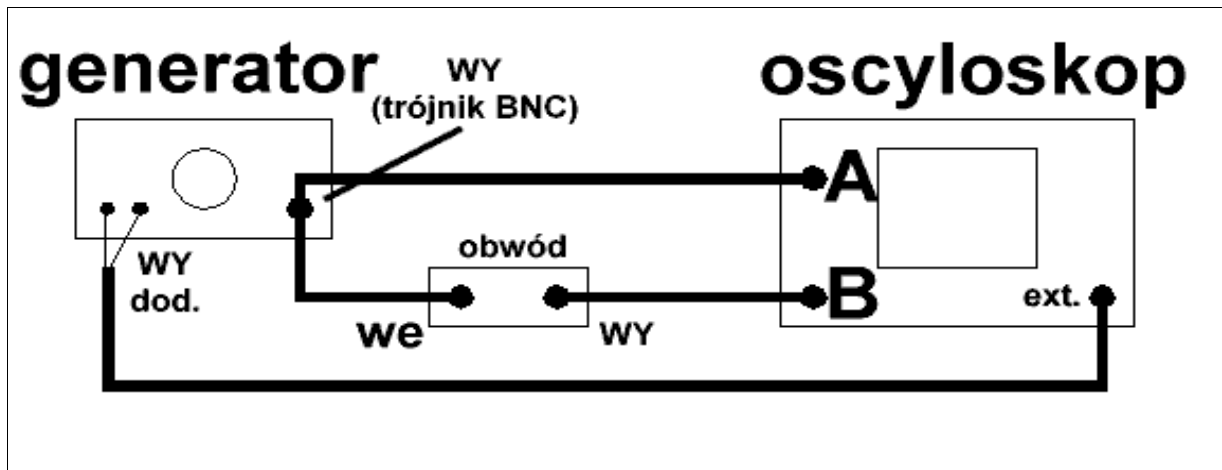
Do przeprowadzenia doświadczenia użyłem diody krzemowej (typ 1N4001), diody (D9Z), diody Zenera, oraz opornika o rezystancji $R=(976\pm 1) \Omega$ (wartość tą zmierzyłem multimetrem cyfrowym). Ponadto użyłem też płytkę montażową, kilka przewodów, oraz generator sygnałów (o nominalnym oporze $R=50\Omega$, dokładność nieznaną) i oscyloskopu.

Doświadczenie rozpocząłem od zmontowania obwodu pomiarowego z diodą krzemową, przedstawionego na rysunku 1, oraz układu pomiarowego, zawierającego ten obwód (rys. 2).

Rysunek 1 - Szkic obwodu pomiarowego



Rysunek 2 - Szkic układu pomiarowego



Następnie podałem na wejście obwodu sygnał trójkątny, o natężeniach szczytowych od -2.5V do 2.5V i częstotliwości 1000Hz, po czym dokonałem pomiaru charakterystyki U_{we} i U_{wy} . Kolejnym krokiem była zamiana kształtu napięcia wejściowego na prostokątny i obserwacja impulsu prądu wstecznego (połączona z pomiarem jego t_p). Te same operacje wykonałem następnie wymieniając diodę na germanową oraz Zenera.

Wyniki pomiarów

Otrzymałem następujące wyniki:

(wyliczając I_d ze wzoru: $I_d = U_{wy}/R$, $U_d = U_{we} - U_{wy}$, a ich błędy otrzymując ze standartowego wzoru na propagację małych błędów)

dla diody Si:

U_{we} [0.01V]	U_{wy} [0.01V]	I_d [0.01 A]	U_d [0.01V]	$\log(I_d/0.01A)$
0	0	0	0	-
30	0	0	30	-
40	4	0,0040984	36	-5,497168225
50	8	0,0081967	42	-4,804021045
55	12	0,0122951	43	-4,398555937
65	16	0,0163934	49	-4,110873864
70	20	0,0204918	50	-3,887730313

przy czym $\Delta U_{we} = \Delta U_{wy} = 0.01V$, $\Delta U_d = 0.02V$, $\Delta I_d = 0.001A$

dla diody Ge:

U_{we} [0.1V]	U_{wy} [0.1V]	I_d [0.1 A]	U_d [0.1V]	$\log(I_d/0.1A)$
0	0	0	0	-
1	0,2	0,0002049	0,8	-8,492900499
1,8	0,4	0,0004098	1,4	-7,799753318
2,8	1	0,0010246	1,8	-6,883462586
3,8	1,8	0,0018443	2	-6,295675922
4,4	2	0,0020492	2,4	-6,190315406
5,2	2,6	0,0026639	2,6	-5,927951141

przy czym $\Delta U_{we} = \Delta U_{wy} = 0.02V$, $\Delta U_d = 0.04V$, $\Delta I_d = 0.00001A$

dla diody Zenera:

U_{we} [1V]	U_{wy} [1V]	I_d [1A]	U_d [1V]	$\log(I_d/1A)$
0	0	0	0	-
2,8	0	0	2,8	-
3	0,2	0,0002049	2,8	-8,492900499

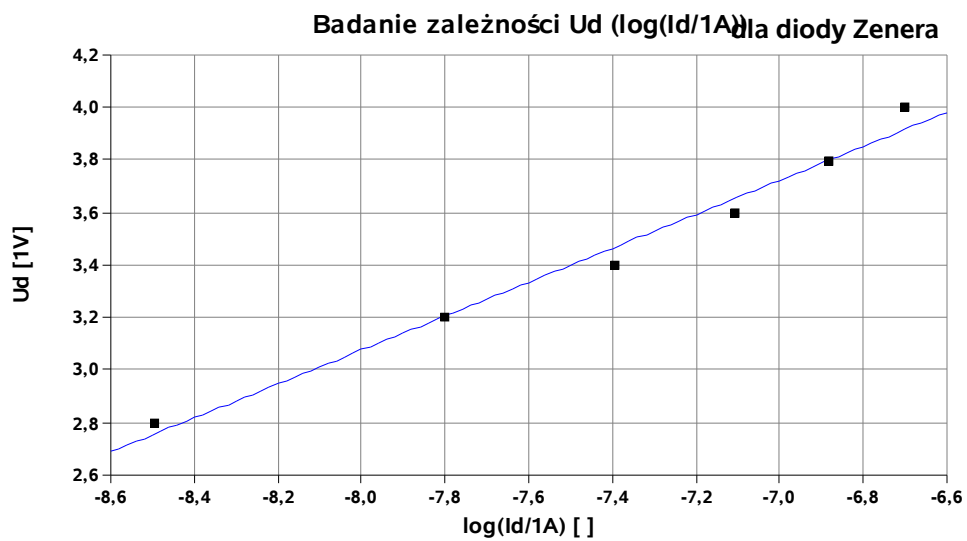
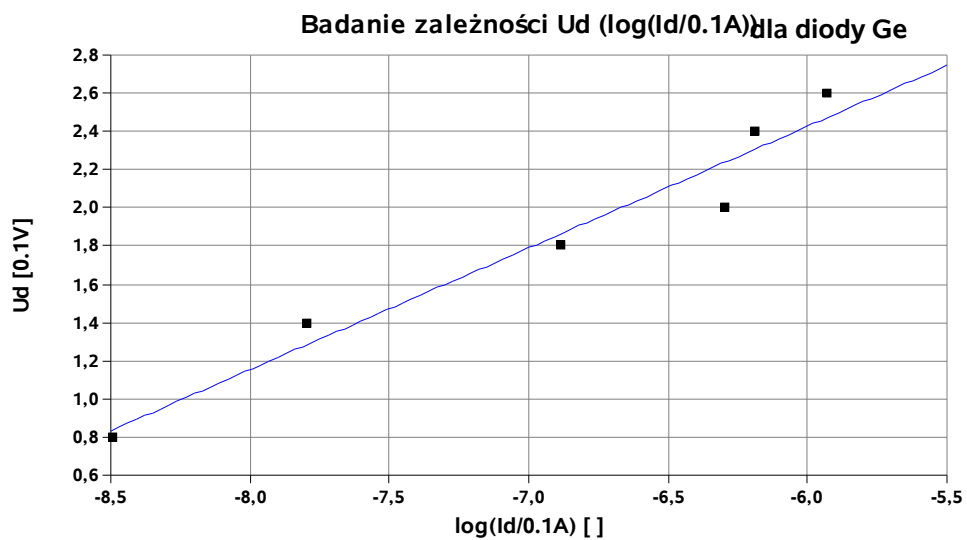
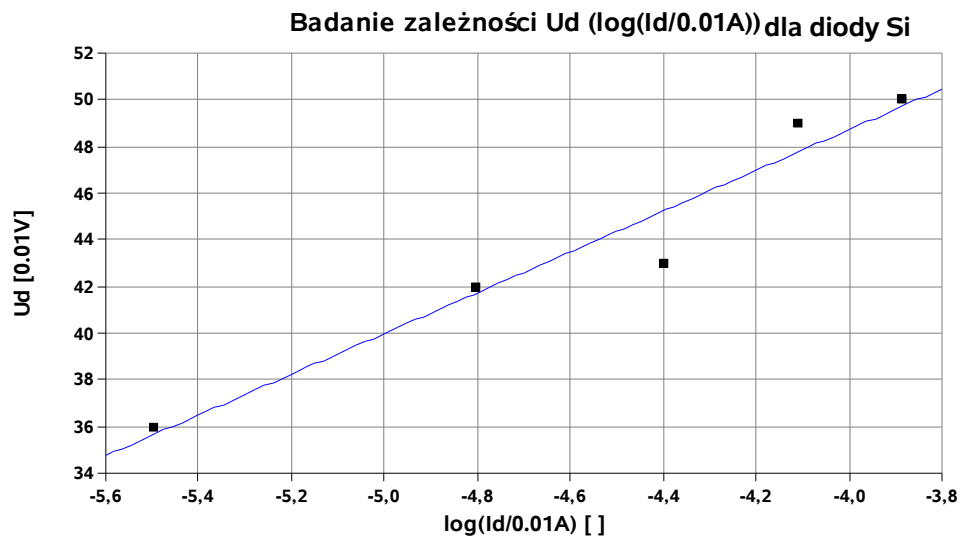
3,6	0,4	0,0004098	3,2	-7,799753318
4	0,6	0,0006148	3,4	-7,39428821
4,4	0,8	0,0008197	3,6	-7,106606138
4,8	1	0,0010246	3,8	-6,883462586
5,2	1,2	0,0012295	4	-6,70114103

przy czym $\Delta U_{we} = \Delta U_{wy} = 0.02V$, $\Delta U_d = 0.04V$, $\Delta I_d = 0.0001A$

(wyniki obliczeń zostały podane w tabelkach z większą dokładnością niż wynosi ich błąd, ponieważ są to wyniki cząstkowe, a tych się nie zaokrągla)

Otrzymane napięcie przewodzenia wyniosło więc $(0.35 \pm 0.05)V$ dla diody krzemowej, poniżej $0.08V$ dla diody germanowej i $(2.8 \pm 0.2)V$ dla diody Zenera. Napięcie Zenera wyniosło $(2.8 \pm 0.2)V$ (oczywiście, dla diody Zenera odwrótnie zainstalowanej). Dla diody krzemowej impuls prądu wstecznego trwał $(0.3 \pm 0.02)\mu s$, natomiast dla diody germanowej nie dało się go zaobserwować.

Wyniki te przedstawione na wykresach prezentują się następująco:



Na powyższych wykresach widać już dopasowaną prostą najmniejszych kwadratów. Dopasowałem ją, korzystając ze wzoru:

$$U_d = \frac{MkT}{e} \left(\log \frac{I_d}{I_g} + 1 \right) + Ir$$

a konkretniej, z jego przybliżenia dla niewielkiego prądu i $I_d \gg I_g$:

$$U_d = \frac{MkT}{e} (\log I_d - \log I_g)$$

wprowadzając $a := MkT/e$, oraz $b := -MkT \cdot \log(I_g)/e$, można powyższe równanie zapisać w postaci:

$$U_d = a \cdot \log(I_g) + b$$

Po dopasowaniu tej prostej do danych pomiarowych otrzymałem następujące wartości a i b (podaję je już po zaokrągleniu):

dla diody Si:

$$\begin{aligned} a &= (8.7 \pm 1.2) \cdot 0.01 \text{ V}, \quad \Delta a/a = 13.65\% \\ b &= (83.6 \pm 5.5) \cdot 0.01 \text{ V}, \quad \Delta b/b = 6.52\% \\ \text{Współczynnik korelacji liniowej } R &= 0.9732 \end{aligned}$$

dla diody Ge:

$$\begin{aligned} a &= (0.637 \pm 0.071) \cdot 0.1 \text{ V}, \quad \Delta a/a = 11.04\% \\ b &= (6.25 \pm 0.5) \cdot 0.1 \text{ V}, \quad \Delta b/b = 7.87\% \\ \text{Współczynnik korelacji liniowej } R &= 0.9765 \end{aligned}$$

dla diody Zenera:

$$\begin{aligned} a &= (0.646 \pm 0.044) \text{ V}, \quad \Delta a/a = 6.69\% \\ b &= (8.25 \pm 0.33) \text{ V}, \quad \Delta b/b = 3.89\% \\ \text{Współczynnik korelacji liniowej } R &= 0.9912 \end{aligned}$$

Opierając się na tych wartościach i przyjmując temperaturę pracy diody równą temperaturze pomieszczenia w jakim przeprowadzałem doświadczenie (a więc $T = (29.3 \pm 0.3) \text{ K}$), otrzymałem następujące wyniki:

dla diody Si:

$$\begin{aligned} M &= 0.345 \pm 0.087 \\ I_g &= (0.671 \pm 0.057) \mu\text{A} \end{aligned}$$

dla diody Ge:

$$\begin{aligned} M &= 0.252 \pm 0.092 \\ I_g &= (5.48 \pm 0.69) \mu\text{A} \end{aligned}$$

dla diody Zenera:

$$\begin{aligned} M &= 2.56 \pm 0.12 \\ I_g &= (28.4 \pm 4.3) \mu\text{A} \end{aligned}$$

Dyskusja wyniku

Jakkolwiek otrzymane wartości I_g nie budzą podejrzeń (rzęd wielkości jest odpowiedni, jak i uzyskanie przez inne osoby przeprowadzające analogiczne doświadczenie zbliżonych wyników), to wyliczone M w przypadku diód Si i Ge nie zgadzają się, w obliczu "testu 3σ " z wartościami teoretycznymi. Jest to bardzo dziwne. Wyjaśnienie tego może być trojaki: albo wartości teoretyczne są nieprawidłowe, albo temperatura pracy diód odbiegała od temperatury otoczenia, bądź też diody mają niezaniebnywalny (czyli duży) nieznaną opór pasożytniczy. Wprawdzie swój udział w błędzie ma też rezystancja 50 omowa generatora, ale w tym przypadku jej wkład jest rzędu 5%

wartości oporu "w obwodzie". Opcja nieprawidłowości danych teoretycznych odpada. W celu sprawdzenia hipotezy $T \approx 293\text{K}$, odwróciłem rozumowanie, zakładając znane (równe teoretycznym) wartości M , lecz nieznaną wartość T (przy czym dla diody Zenera konieczne okazało się przyjęcie założenia, iż jest ona zbudowana z arsenku galu). Otrzymałem następujące (przybliżone) wyniki:

dla diody Si: $T \approx 155,32\text{K}$

dla diody Ge: $T \approx 211,20\text{K}$

dla diody Zenera: $T \approx 325,93\text{K}$

Wniosek z tego jest taki, iż albo każda z diód ma zaiste inną temperaturę pracy (ale dlaczego niższą od temperatury otoczenia?), albo ich opory pasytywne są niezaniemalne (rzędu kilkudziesięciu-kilkuset omów). Co do wyznaczonych wartości napięć przewodzenia, to zgadzają się one, w przedziale potrójnego błędu pomiarowego, z wartościami teoretycznymi dla diody Zenera, ale w pozostałych przypadkach wynik "nie mieści" się w tym przedziale. Jest to jednak wytłumaczalne - wyliczone "czyste" U_p nie uwzględnia jeszcze poprawki współczynnika M .