

Materiały Mikroelektroniki

Ćwiczenie 3

Pomiary czasu życia nośników w półprzewodnikach

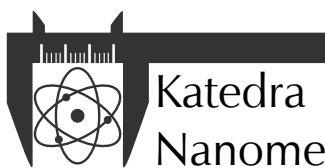
dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof. PWr (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Pojęcia: nośniki mniejszościowe i większościowe, równowagowe i nadmiarowe w półprzewodnikach
2. Mechanizmy rekombinacji nośników w półprzewodnikach
3. Rekombinacja powierzchniowa
4. Pojęcia: średni czas życia nośników mniejszościowych, średnia, droga dyfuzji nośników mniejszościowych, szybkość rekombinacji powierzchniowej
5. Metoda Reverse Recovery
 - a) schemat ideowy i zasada pomiaru
 - b) czas magazynowania ładunku
 - c) sposób wyznaczenia czasu życia nośników
6. Metoda Open Circuit Voltage Decay
 - a) schemat ideowy i zasada pomiaru
 - b) typowy przebieg $V(t)$
 - c) sposób wyznaczenia czasu życia nośników
7. Metody wyznaczania ruchliwości nośników w półprzewodnikach i dielektrykach: TOF, TVS
8. Zjawisko Halla i jego zastosowanie do wyznaczenia ruchliwości nośników.

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Metoda „Reverse Recovery”	1
1.2	Metody Open Circuit Voltage Decay	2
2	Przebieg ćwiczenia	4
2.1	Metoda RR	4
2.2	Metoda OCVD	5
2.3	Sprawozdanie	6
3	Dodatki	7



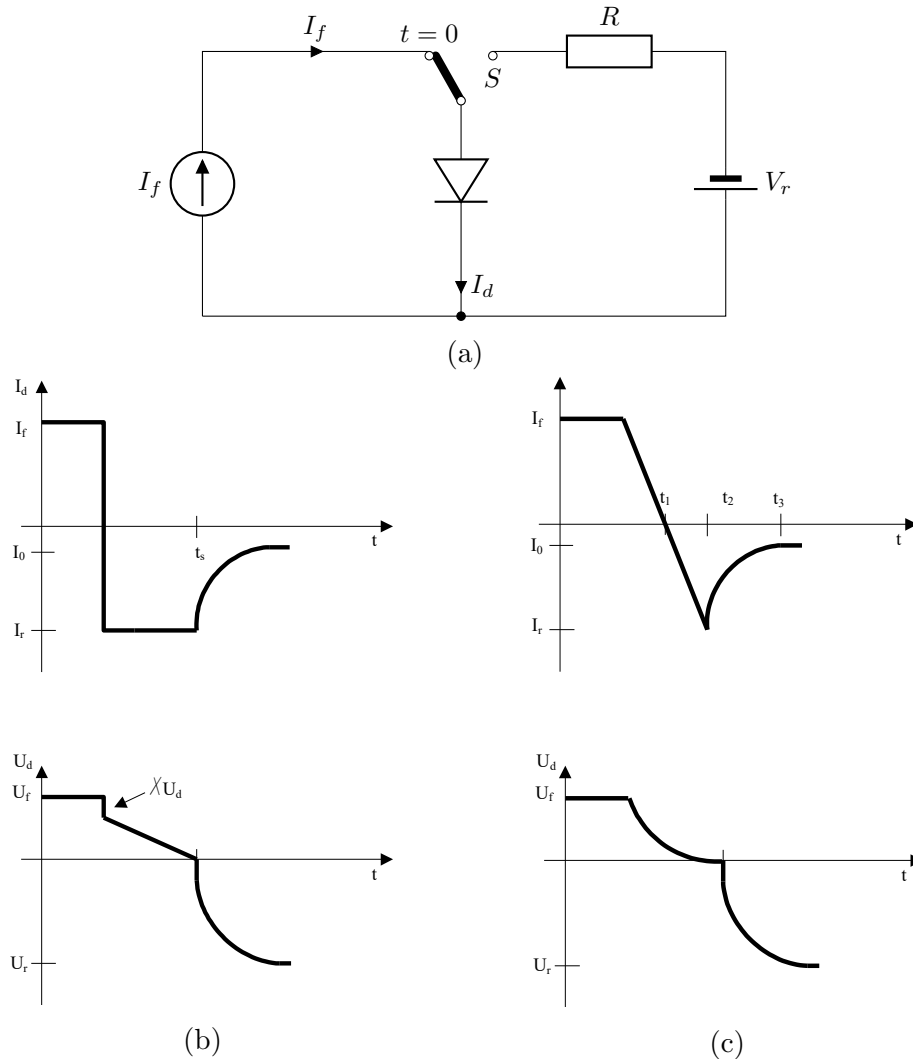
Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

1.1 Metoda „Reverse Recovery”

Metoda RR służy do pomiaru czasu życia nośników. Uproszczony schemat pomiarowy oraz przebiegi czasowe prądu i napięcia przedstawione są na rysunku 1. Wyróżnia się dwie główne metody pomiarowe. Na rys. 1b prąd jest gwałtownie przełączany z przewodzenia na wsteczny poprzez zmianę pozycji przełącznika S, podczas gdy na rys. 1c pokazano jak prąd zmienia się stopniowo (typowo dla urządzeń dużej mocy gdzie nagłe przełączenie prądu nie jest możliwe).



Rysunek 1: a) Schemat ideowy układu pomiarowego w metodzie RR, przebiegi prądu i napięcia w metodzie RR przy pobudzeniu: b) sygnałem prostokątnym, c) sygnałem piłokształtnym.

Dla dokładnego opisu metody należy przeanalizować rys. 1b oraz 1c. Prąd przewodzenia I_f płynie przez diodę w czasie $t < 0$, a napięcie odkładające się na diodzie jest równe U_f . Nośniki nadmiarowe wstrzykiwane są do obszaru quasi-neutralnego, co skutkuje bardzo małą impedancją przyrządu. W chwili $t = 0$ prąd jest przełączany z I_f do I_r gdzie $I_r = (U_r - U_f)/R$. Bardzo mała rezystancja diody jest do pominięcia ponieważ dioda pozostaje w przewodzeniu w początkowej fazie płynięcia I_r . Prądy mogą być bardzo szybko przełączane w urządzeniach z nośnikami większościowymi. Koncentracja nośników większościowych maleje podczas polaryzacji wstecznej, nośniki są wymiatane przez prąd wsteczny, część nośników rekombinuje. Koncentracja nośników mniejszościowych na obu brzegach warstwy ładunku przestrzennego w złączu jest w przybliżeniu równa 0 w $t = t_s$, a napięcie na diodzie dąży do 0. Dla $t > t_s$ koncentracja

nośników mniejszościowych obniża się uzyskując wartość poniżej zera, napięcie dochodzi do wartości U_r , a prąd uzyskuje wartość równą wartości prądu upływu I_0 .

Krzywą przebiegu I-t dla potrzeb przeprowadzenia analizy podzielić można na części: stałego prądu w przedziale $0 \leq t \leq t_s$ oraz fazę powrotu do stanu początkowego dla $t > t_s$. Czas t_s jest określany czasem magazynowania i jest związany z czasem życia nośników zależnością

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_s}{\tau_r}} = \frac{1}{1 + \frac{I_r}{I_f}} \quad (1)$$

gdzie erf jest funkcją błędu.

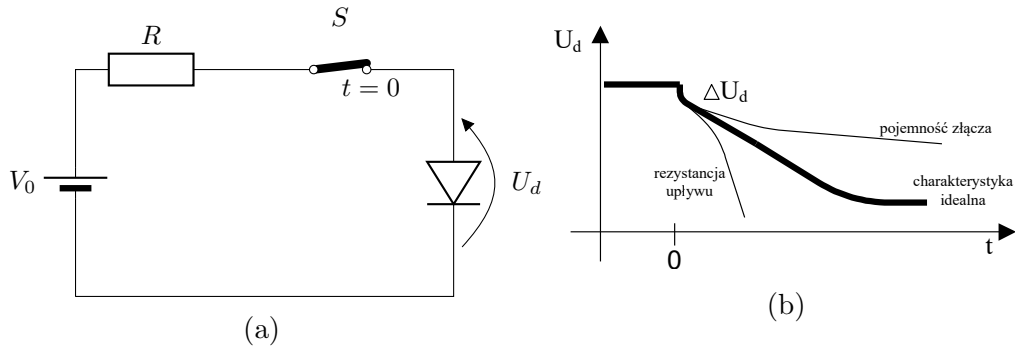
Przybliżona analiza magazynowania ładunku uwzględniająca ładunek Q_s w momencie $t = t_s$ prowadzi do uzyskania następującego równania dla czasu magazynowania

$$t_s = \tau_r \left[\ln \left(1 + \frac{I_f}{I_r} \right) - \ln \left(1 + \frac{Q_s}{I_r \tau_r} \right) \right] \quad (2)$$

przy założeniu $I_f \gg I_r$ (co zapewniono w układzie pomiarowym) człon drugi wyrażenia dąży do zera. Sporządzając wykres $t_s = f \left(1 + \frac{I_f}{I_r} \right)$ można wyznaczyć τ_r , który jest efektywnym czasem życia reprezentującym rekombinację powierzchniową oraz objętościową.

1.2 Metody Open Circuit Voltage Decay

Zasada pomiaru przedstawiona jest na rysunku 2. Dioda spolaryzowana jest w kierunku przewodzenia w chwili $t = 0$ kiedy przełącznik S jest otwarty i napięcie zanika z powodu rekombinacji nośników większościowych co pokazano na rysunku. Widoczny stopień $\Delta U_D = I_f r_s$ spowodowany jest spadkiem napięcia na rezystancji wewnętrznej diody obserwowanym przy zaniku prądu przewodzenia. Na podstawie ΔU_D wnioskować można o rezystancji szeregowej badanego przyrządu.



Rysunek 2: a) Schemat ideowy układu pomiarowego w metodzie OCVD, b) Typowy przebieg napięcia $U_d = f(t)$ w metodzie OCVD

W przeciwieństwie do metody RR nośniki nie są wymiatane przez prąd wsteczny lecz w całości ulegają rekombinacji. Koncentracja nośników mniejszościowych Δn_p w obszarze quasi-neutralnym jest związana z napięciem złącza $V_j(t)$ w następujący sposób

$$\Delta n_p(t) = n_{p0} \left(\exp \left(\frac{q V_j(t)}{k T} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

gdzie n_{p0} to koncentracja równowagowych nośników mniejszościowych. Rozwiązując równanie otrzymuje się

$$V_j(t) = \frac{k T}{q} \ln \left(\frac{\Delta n_p(t)}{n_{p0}} + 1 \right) \quad (4)$$

Równanie powyższe pokazuje, że napięcie złącza maleje wraz ze spadkiem $\Delta n_p(t)$ wskutek rekombinacji. Dlatego pomiar zależności napięcia od czasu jest pomiarem koncentracji nośników nadmiarowych w funkcji czasu. Napięcie na diodzie równe jest $V_d = V_j + V_b$, gdzie V_b jest napięciem bazy, zanedbując napięcie emitera. Napięcie bazy jest skutkiem nierównej wartości ruchliwości elektronów i dziur, znane jest jako napięcie Dembera, wyrażane jako

$$V_b(t) = \frac{kT(b-1)}{q(b+1)} \ln \left(1 + \frac{(b+1)\Delta n_p(t)}{n_{p0} + bp_{p0}} \right) \quad (5)$$

gdzie $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$. Napięcie Dembera można zaniechać jeżeli poziom wstrzykiwania nośników jest niski i będzie pominięte w dalszych rozważaniach. Zakładając, że $V_d(t) \approx V_j(t)$ dalej oznaczane będzie jako $V(t)$ dla czasowo zmiennego napięcia przyrządu.

Rozpatrując najprostszy przypadek dla grubości podłoża spełniającej nierówność $d \gg L_n$ oraz niski poziom wstrzykiwania nośników pokazać można, że

$$V(t) = V(0) - \frac{kT}{q} \ln \left(\operatorname{erfc} \sqrt{\frac{t}{\tau_r}} \right) \quad (6)$$

gdzie $V(0)$ jest napięciem na diodzie przed otwarciem przełącznika, a $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ jest dopełnieniem funkcji błędu. Równanie powyższe przedstawione na poniższym rysunku użytkano dla warunku $V(t) \gg \frac{kT}{q}$. Krzywa złożona jest z dwóch części, pierwsza - o szybkim spadku, druga - zbliżona do liniowej. Nachylenie krzywej czasowej napięcia dla spełnionego warunku $t \geq 4\tau_r$ równe jest w przybliżeniu

$$\frac{dV(t)}{dt} \approx - \frac{\frac{kT}{q}}{\tau_r \left(1 - \frac{\tau_r}{2t} \right)} \quad (7)$$

zaniedbując składnik $\frac{\tau_r}{2t}$, czas życia nośników wyznaczany jest przez nachylenie zbocza i wynosi

$$\tau_r = - \frac{\frac{kT}{q}}{\frac{dV(t)}{dt}} \quad (8)$$

Poczynione założenie w powyższym wyprowadzeniu wnosi, że rekombinacja determinowana jest przez rekombinację w obszarze quasi-neutralnym, której zależność w funkcji napięcia jest eksponencjalna i ma postać $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$. Dla rekombinacji w warstwie ładunku przestrzennego obowiązuje zależność $\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$ gdzie n jest współczynnikiem doskonałości diody o wartości z przedziału od 1 do 2. Zatem przedstawione wyrażenie na czas życia nośników powinno zawierać dodatkowo współczynnik n . Oczywiście gdy napięcie diody spadnie od wartości $V(0) = 0,6V$ do około $0V$ wówczas współczynnik n osiągnie wartość zbliżoną do 2.

Jak we wszystkich technikach pomiaru czasu życia nośników, τ_r jest efektywnym czasem życia nośników, na który ma wpływ rekombinacja w emiterze oraz rekombinacja powierzchniowa (dla diod z krótką bazą).

W przypadku wysokiego poziomu wstrzykiwania nośników ich czas życia wyraża się zależnością

$$\tau_r = - \frac{2 \frac{kT}{q}}{\frac{dV(t)}{dt}} \quad (9)$$

co oznacza, że koncentracja nośników większościowych w bazie jednorodna, rekombinacja końca obszaru jest do pominięcia, a koncentracja nośników większościowych jest większa aniżeli koncentracja domieszki w bazie. Krzywa zależności $V(t)$ zwykle składa się z dwóch części o różnym współczynniku kierunkowym.

2 Przebieg ćwiczenia

Grupa studencka otrzymuje od prowadzącego diody zamocowane w podstawce, dla których mają zostać wykonane pomiary czasu życia nośników metodą RR i OCVD.

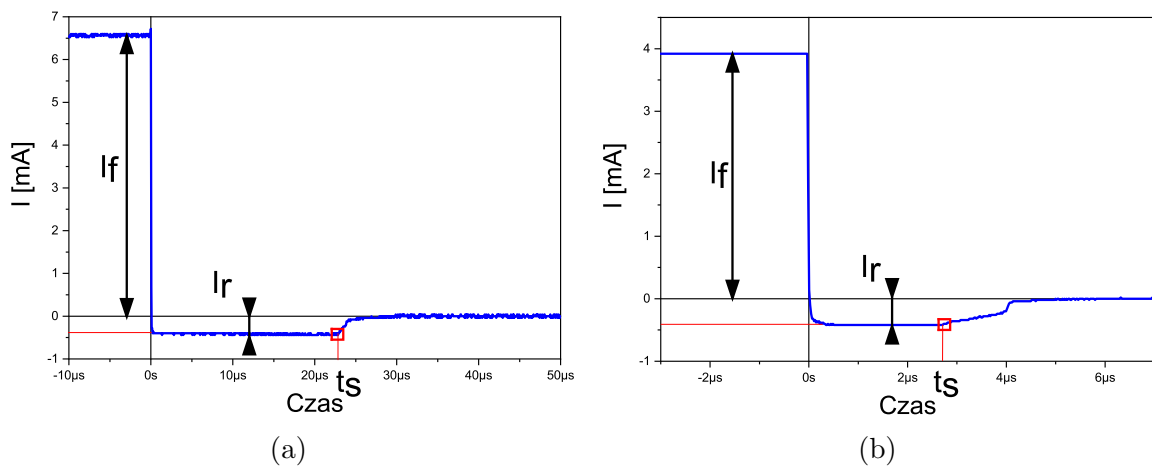
2.1 Metoda RR

Przygotowanie do pomiaru

Po zamocowaniu diody w płytce z układem pomiarowym do metody RR należy zgodnie z oznaczeniami na płytce podłączyć ją do:

- zasilacza laboratoryjnego, wykorzystując dwie sekcje zasilania w celu zapewnienia **bipolarnego** zasilania układu pomiarowego, wymaganego w metodzie RR; na zasilaczu należy wstępnie ustalić napięcia obu sekcji na 15 V, ograniczenie prądowe na 100 mA;
- generatora funkcyjnego wytwarzającego przebieg prostokątny, 1 kHz, $3V_{pp}$, bez składowej stałej;
- oscyloskopu, sprzężonego **stałoprądowo** z obwodem pomiarowym, wyzwalanie ustalić na opadające zbocze przebiegu dobierając również poziom wyzwalania;

Prawidłowo zestawiony układ pomiarowy powinien dać na oscyloskopie obraz zbliżony do przedstawionego na rysunku 3.



Rysunek 3: Przykładowe oscylogramy z metody RR

Stanowisko jest gotowe do przeprowadzenia pomiaru. W układzie pomiarowym istnieje możliwość zmiany:

- natężenia prądu I_f przez zmianę napięcia dodatniego zasilającego układ pomiarowy; zakres zmian napięcia: (2,5 V ÷ 20 V);
- natężenia prądu I_r przez zmianę napięcia ujemnego zasilającego układ pomiarowy; zakres zmian napięcia: (-2,5 V ÷ -10 V);

Układ pomiarowy przy jednakowej wartości obu napięć zapewnia prąd I_f około 10x większy od prądu I_r , co z kolei jest zgodne z warunkiem stosowania uproszczenia we wzorze (2). Obserwacja prądu diody za pomocą oscyloskopu jest możliwa dzięki rezystorowi pomiarowemu o rezystancji 100Ω, który jest włączony w szereg z badaną diodą.

Pomiar

Dla podanego przez prowadzącego napięcia odpowiedzialnego za prąd I_r należy przeprowadzić serię pomiarów dla różnych I_f . Wartość I_r nie zmienia się w czasie pomiarów i może być wyznaczona raz, na początku serii pomiarów. Dla każdego pomiaru należy zanotować I_f

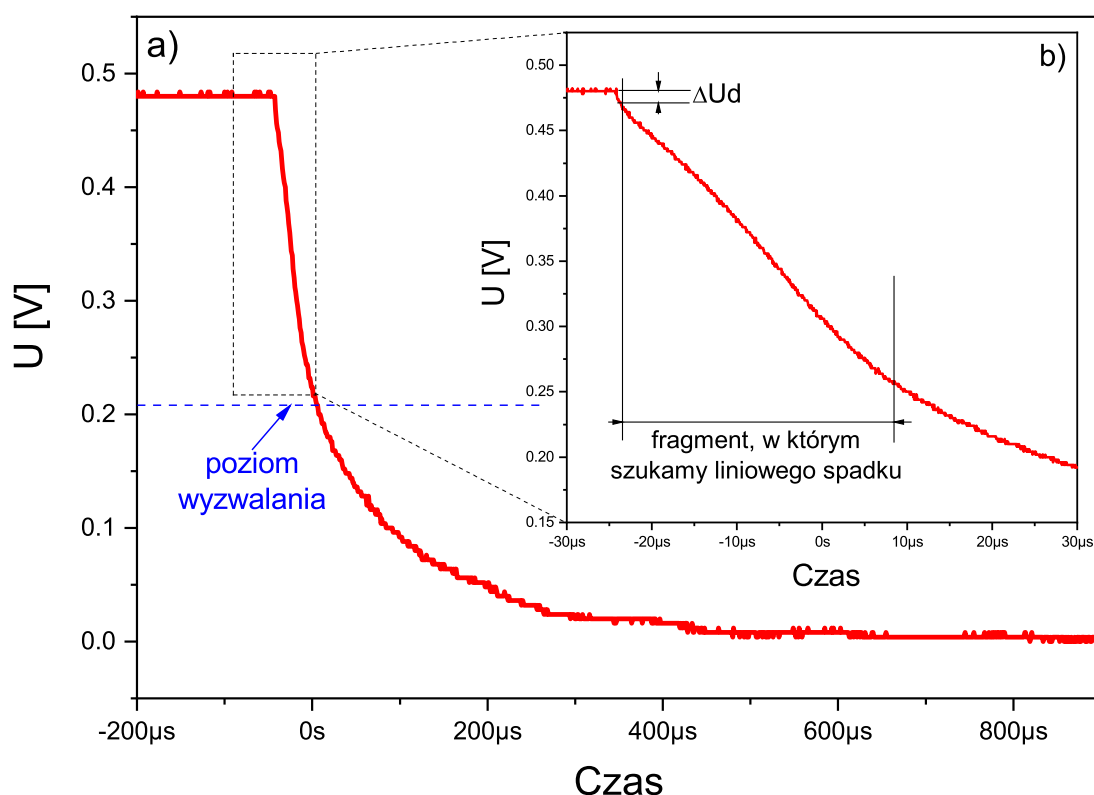
oraz t_s , zmierzone przy pomocy oscyloskopu. Dla zweryfikowania pomiaru można przeprowadzić drugą serię pomiarów dla innej wartości I_r . Dla zmierzonych serii danych wykreślić zależność $t_s = f\left(1 + \frac{I_r}{I_r}\right)$ w odpowiednim układzie współrzędnych (oś x logarytmiczna). Z liniowej części wykreślonej zależności wyznaczyć efektywny czas życia nośników w badanych elementach.

2.2 Metoda OCVD

Przygotowanie do pomiaru

W tej części ćwiczenia wykorzystana będzie druga część płytki. Należy przełożyć diodę oraz podłączyć generator i oscyloskop w odpowiednie miejsca tej sekcji oraz zmienić ustawienia przyrządów w następujący sposób:

- zasilacz laboratoryjny: zasilanie pojedynczym napięciem, 5 V, ograniczenie prądowe 50 mA;
- generator funkcyjny: przebieg prostokątny 10 Hz, Hi-Level 5 V, Lo-Level 0 V;
- oscyloskop: sprzężenie stałoprądowe z układem pomiarowym, wyzwalać na opadającej zboczce sygnału odpowiednio ustawiając poziom wyzwalać oraz ustalić odpowiednio podstawę czasu.

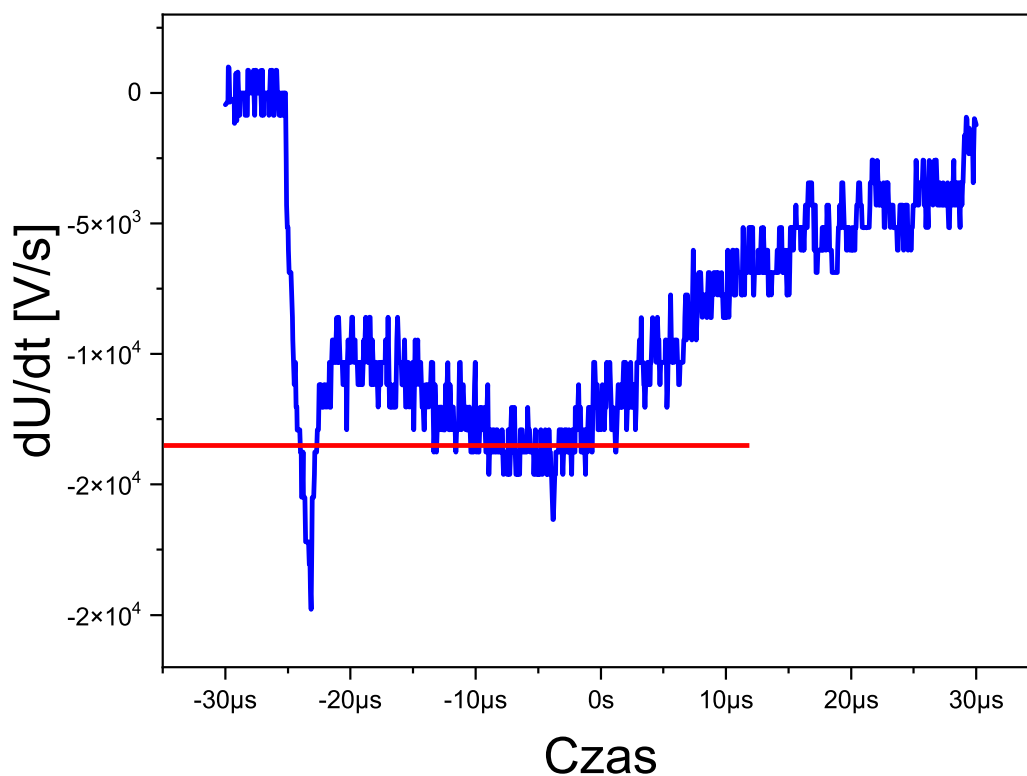


Rysunek 4: Przykładowy wstępny (a) i dokładny (b) oscylogram w metodzie OCVD

Po prawidłowym podłączeniu układu i ustawieniu parametrów, na oscyloskopie powinno dać się obserwować stabilny przebieg podobny do przedstawionego na rysunku 4a. Obraz obserwowany w takiej skali da jednak mało dokładny pomiar czasu życia nośników. Należy zmieniając podstawę czasu, niekiedy również poziom wyzwalać, uzyskać stabilny oscylogram jak na rysunku 4b, zajmujący jak największą część ekranu oscyloskopu.

Pomiar

Po ustaleniu warunków pomiaru należy skorzystać z programu DSO3062A.vee do akwizycji danych z oscyloskopu. W celu wyznaczenia nachylenia liniowego odcinka przebiegu należy wykonać (np. w programie Origin) różniczkowanie odczytanego przebiegu. Dla odcinka liniowego wartość różniczki będzie stała. Dane odczytane z oscyloskopu są silnie zaszumione i ich bezpośrednie różniczkowanie nie daje dobrego efektu. Przed różniczkowaniem dane należy wygładzić (Analysis→Smoothing→Adjacent Averaging). Wygładzanie tą metodą polega na uśrednianiu wartości n sąsiadujących ze sobą punktów. Należy dobrać n $10 \div 100$ tak, aby znaleźć najmniejszą wartość n przy której różniczka wygładzonego przebiegu jest zaszumiona w stopniu umożliwiającym odczytanie wartości różniczki na odcinku, gdzie jest ona stała. Niektóre diody nie wykazują dokładnie liniowego spadku napięcia w funkcji czasu. Różniczkę należy wówczas wyznaczyć w sposób przybliżony przyjmując najbardziej płaski fragment jako odpowiadający szukanej wartości, jak na rysunku 5.



Rysunek 5: Przykładowy przebieg różniczki dU/dt

Ostatecznie należy wyznaczyć wartość czasu życia nośników w diodzie, zgodnie ze wzorem 8 i 9.

2.3 Sprawozdanie

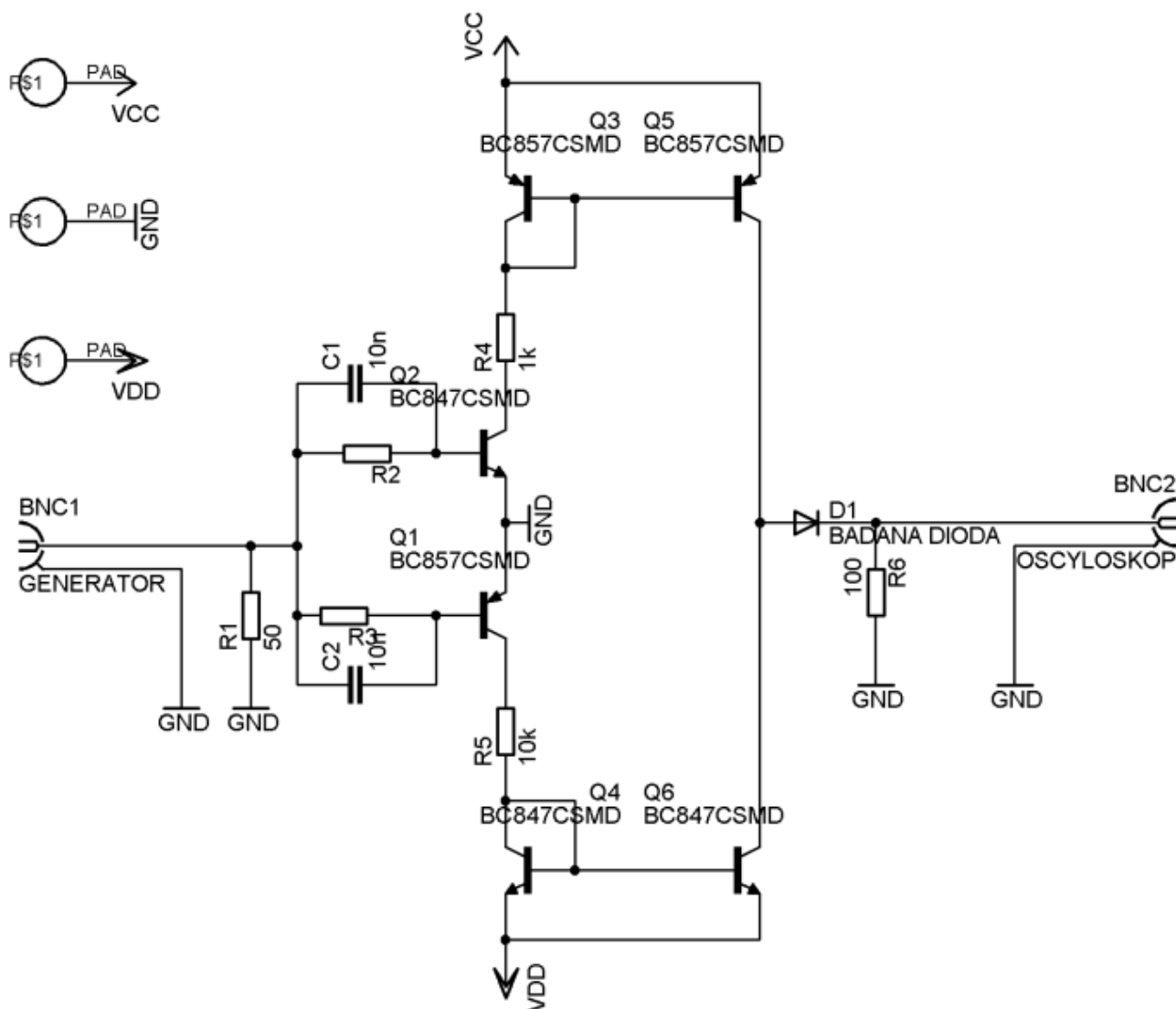
W sprawozdaniu powinny znaleźć się:

- lista badanych elementów
- tabelka z wynikami pomiarów czasu magazynowania i wykresy z metody RR
- oscylogramy z metody OCVD i ich różniczki
- obliczenia i wyznaczone wartości czasu życia nośników w badanych elementach.

3 Dodatki

Układ pomiarowy w metodzie RR składa się z:

- kluczy Q1 i Q2 wraz układem RC przyspieszającym przełączanie i rezystorem R1 dopasowującym impedancję wejścia
- luster prądowych Q3-Q5 i Q4-Q6
- diody badanej i rezystora pomiarowego R6

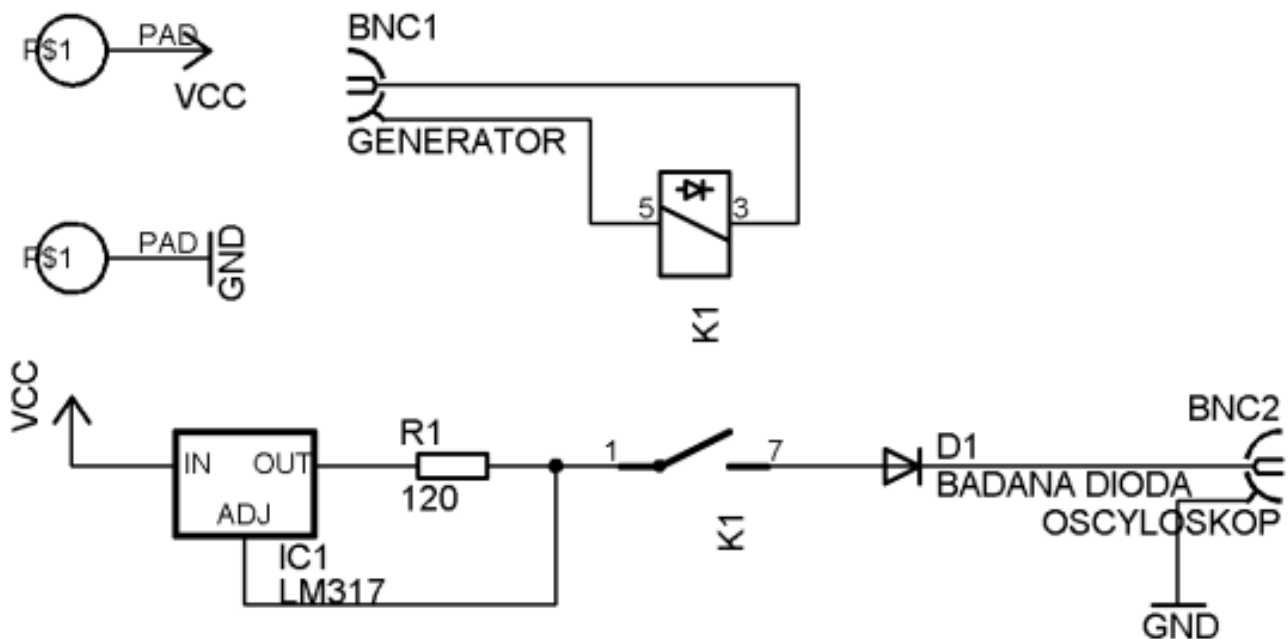


Rysunek 6: Schemat układu pomiarowego w metodzie RR

Przy wysterowaniu układu dodatnim napięciem z generatora, załączony jest klucz Q2, wyłączony jest klucz Q1. Lustro prądowe Q3-Q5 przewodzi prąd określony wartością rezystora R4 i napięciem na tym rezystorze (w przybliżeniu V_{cc} pomniejszony o U_{be} Q3). Prąd ten polaryzuje diodę w kierunku przewodzenia.

Przy wysterowaniu układu ujemnym napięciem z generatora sytuacja jest przeciwna, przewodzi Q1, Q2 jest zatkany, dioda polaryzowana jest w stronę zaporową prądem z lustra prądowego Q4-Q6, określonym przez wartość rezystancji R5 i w przybliżeniu $V_{ee} - U_{be}$ tranzystora Q4. R5 jest 10x większy od R4, przez co przy $V_{cc} = V_{ee}$ prąd polaryzujący diodę zaporowo jest 10x mniejszy od prądu polaryzującego diodę w stronę przewodzenia.

Układ pomiarowy w metodzie OCVD jest prostszy. Składa się ze źródła prądowego na układzie LM317 oraz przełącznika sterowanego napięciem z generatora. Przełącznik załącza i rozłącza prąd polaryzujący badaną diodę, na oscyloskopie obserwuje się przebieg napięcia na diodzie.



Rysunek 7: Schemat układu pomiarowego w metodzie OCVD

Literatura

- [1] Wykład
- [2] M. Kowtoniuk, A. Koncewoj, Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych, Warszawa 1973
- [3] Wiesław Marciniak, Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
- [4] D.K. Schroeder., Semiconductor material and device characterization, 2nd ed. Wiley&Sons, Inc., New York, 1998