



# Politechnika Wroclawska

## Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie nr 9

### Pomiary czasu życia nośników w półprzewodnikach

#### I. 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.

#### II. Program ćwiczenia:

1. Pomiar czasu życia nośników metodą RR
2. Pomiar czasu życia nośników metodą OCVD
3. Pomiar ruchliwości nośników metodą Halla

#### III. Literatura:

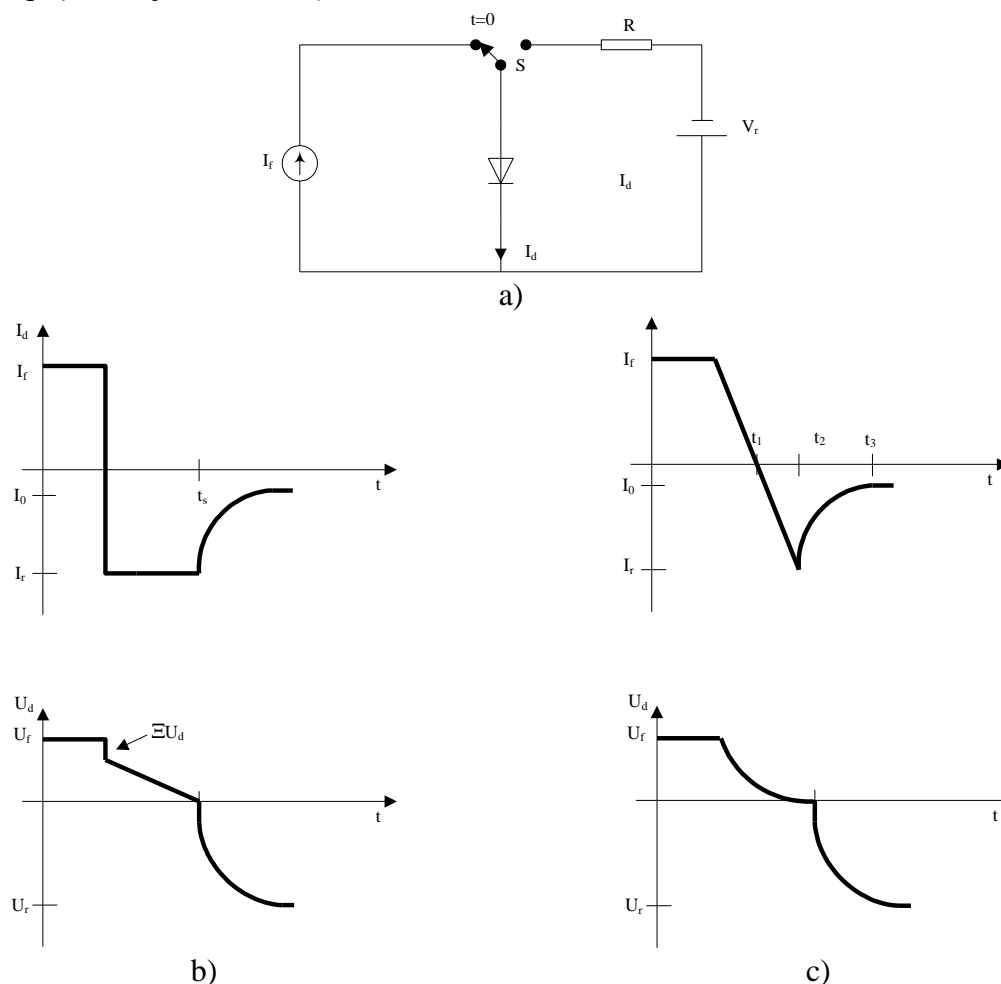
1. Wykład
2. M. Kowtoniuk, A. Koncewoj, Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych, Warszawa 1973
3. Wiesław Marciniak, Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
4. D.K. Schroeder., Semiconductor material and device characterization, 2nd ed. Wiley&Sons, Inc., New York, 1998

**W czasie wykonywania ćwiczenia przestrzegaj przepisów BHP!**

# 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. 1a oraz 1b. Prąd przewodzenia  $I_f$  płynie przez diodę w czasie  $t < 0$ , a napięcie odkładające się na diodzie jest równe  $U_f$ . Nośniki namiarowe 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  $\operatorname{erf}$  jest funkcją błędu.

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

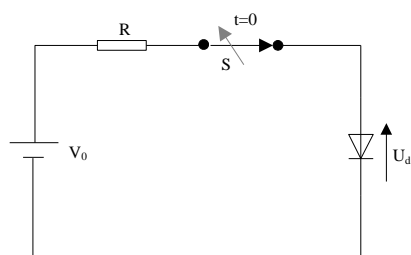
$$t_s = \tau_r \left[ \ln \left( 1 + \frac{I_f}{I_r} \right) - \ln \left( 1 + \frac{Q_s}{I_r \tau_r} \right) \right] \quad (2)$$

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  $\tau_r$ , który jest efektywnym czasem życia reprezentującym rekombinację powierzchniową oraz objętościową.

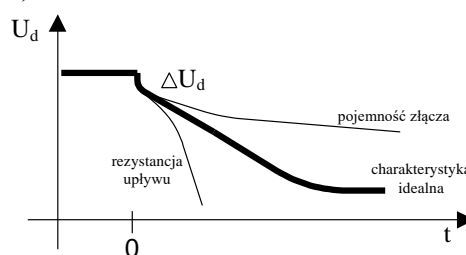
## 1.2. Metody Open Circuit Voltage Decay

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  $\Delta U_d$  wnioskować można o rezystancji szeregowej badanego przyrządu.

a)



b)



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  $\Delta n_p$  w obszarze quasi-neutralnym jest związana z napięciem złącza  $V_j(t)$  w następujący sposób

$$\Delta n_p(t) = n_{p0} \left( \exp \left( \frac{qV_j(t)}{kT} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

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

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

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

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

gdzie  $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ . Napięcie Dembera można zaniebac 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 najprostszyp 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 uzyskano 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 powinien zawierać dodatkowo współczynnik  $n$ . Oczywiście gdy napięcie diody spadnie od wartości  $V(0) = 0,6 \text{ V}$  do około  $0 \text{ V}$  wówczas współczynnik  $n$  osiągnie wartość zbliżoną do 2.

Jak we wszystkich technikach pomiaru czasu życia nośników,  $\tau_r$  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

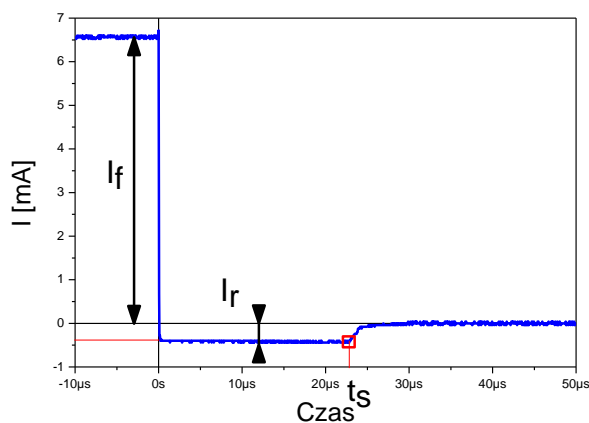
#### 2.1.1. Przygotowanie do pomiaru

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

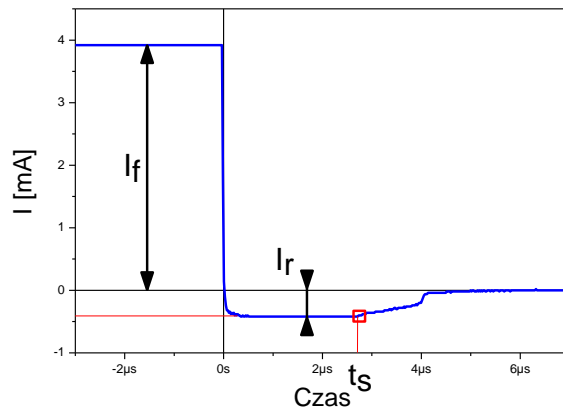
- zasilacza laboratoryjnego, wykorzystując dwie sekcje zasilania w celu zapewnienia **bipolarnego** zasilania układu pomiarowego, wymaganego w metodzie RR; na zasilaczu należy wstępnie ustalić napięcia obu sekcji na  $5 \text{ V}$ , ograniczenie prądowe na  $100 \text{ mA}$ ;
- generatora funkcyjnego wytwarzającego przebieg prostokątny,  $1 \text{ kHz}$ ,  $3 \text{ V}_{pp}$ , 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.

a)



b)



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 100  $\Omega$ , który jest włączony w szereg z badaną diodą.

### 2.1.2. 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  $t_s = f\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right)$ , w odpowiednim

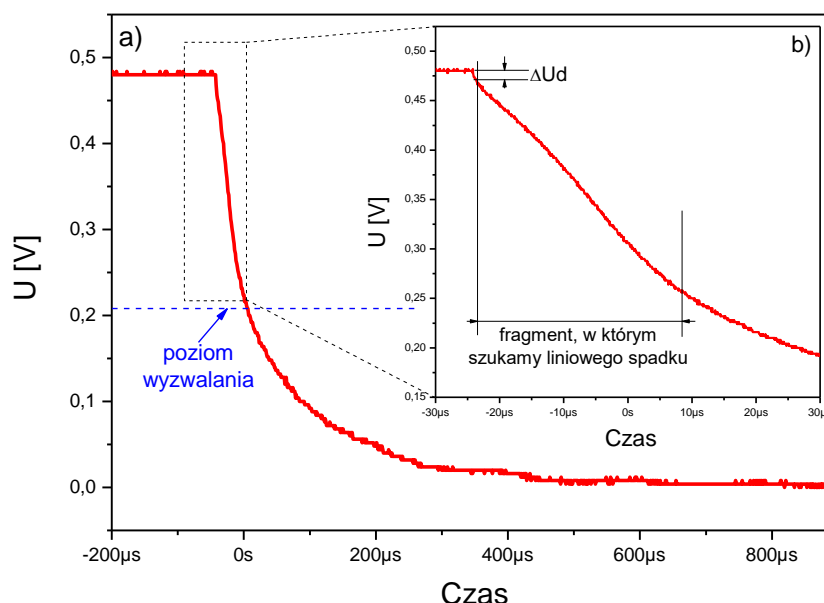
układzie współrzędnych (oś x logarytmiczna). Z liniowej części wykreślonej zależności wyznaczyć efektywny czas życia nośników w badanych elementach.

## 2.2. Metoda OCVD

### 2.2.1. Przygotowanie do pomiaru

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

- zasilacza laboratoryjnego; zasilanie pojedynczym napięciem, 5 V, ograniczenie prądowe 50 mA;
- generatora funkcyjnego wytwarzającego przebieg prostokątny 10 Hz, Hi-Level 5 V, Lo-Level 0 V;
- oscyloskopu sprzężonego stałoprądowo z układem pomiarowym, wyzwalać ustalić na opadające zbocze sygnału odpowiednio ustawiając poziom wyzwalań i 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 wyzwalania, uzyskać stabilny oscylogram jak na rysunku 4b, zajmujący jak największą część ekranu oscyloskopu.

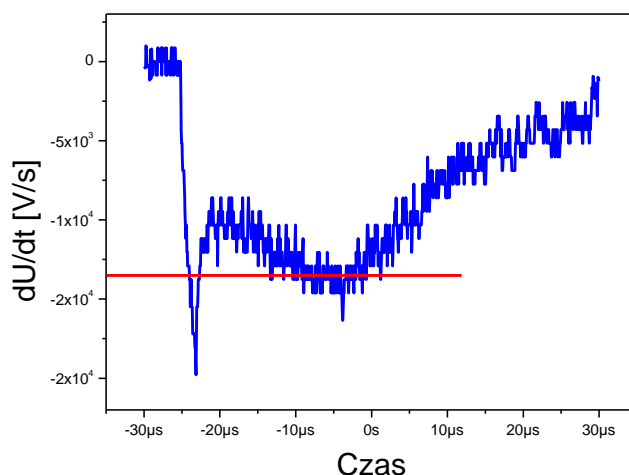
### 2.2.2. Pomiar

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 ÷ 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.

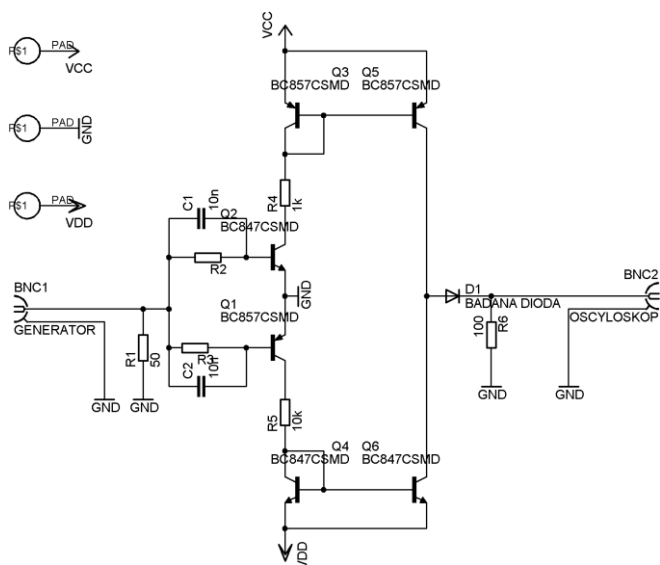
### 2.3. Sprawozdanie

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.

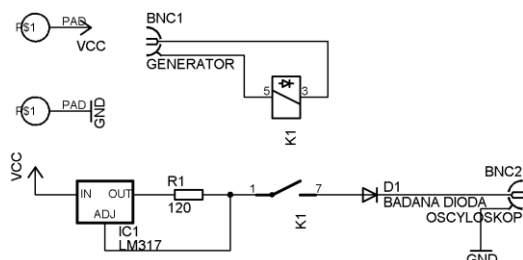
### 3. Dodatki

#### 3.1. Schematy układów pomiarowych



Rysunek 4. Schemat układu pomiarowego w metodzie RR

Przy wystawianiu 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  $V_{ce} - U_{be}$  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.



Rysunek 5. Schemat układu pomiarowego w metodzie OCVD

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

Przy wystawianiu 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.

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