



LABORATORIUM PRZYRZĄDÓW I UKŁADÓW MOCY

Ćwiczenie 1F

**Fizyczne podstawy działania
przysządów
półprzewodnikowych mocy**
Przewodzenie silnych prądów
Blokowanie wysokich napięć

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2019

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia.....	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Diody mocy.....	7
2.1. Dioda PIN.....	7
2.1.a. Budowa.....	7
2.1.b. Stan przewodzenia.....	8
2.1.c. Stan zaworowy oraz struktury bez i z przebiciem skośnym.....	10
2.2. Dynamiczne właściwości diod PIN.....	12
2.2.a. Załączanie.....	12
2.2.b. Wylączenie.....	12
2.2.c. Parametry stanu wylączenia.....	16
2.2.d. Parametry stanu załączania.....	19
2.3. Diody ze złączem Schottky'ego.....	20
2.3.a. Budowa diody mocy Schottky'ego i stan zaworowy.....	20
2.3.b. Stan przewodzenia.....	21
2.3.c. Diody kombinowane.....	23
2.4. Zagadnienia aplikacyjne.....	24
2.4.a. Diody w układach elektroniki mocy.....	24
2.4.b. Parametry diod mocy.....	24
C Doświadczenie	27
3. Symulacje.....	27
3.1. Badanie diod PIN i SBD w stanie przewodzenia.....	27
Rozkład potencjału.....	27
Korzystanie z arkusza kalkulacyjnego.....	28
Zapisywanie wyników graficznych.....	29
Tworzenie tabel i wykresów.....	29
Wykonanie symulacji i analiza wyników.....	30
3.2. Badanie struktury PIN w stanie zaworowym.....	31
Korzystanie z arkusza kalkulacyjnego.....	31
Zapisywanie i przetwarzanie wyników.....	32
Wykonanie symulacji i analiza wyników.....	32
E Informacje	33
4. Wymagana wiedza.....	33
4.1. Przygotowanie do wykonywania ćwiczenia.....	33
Część pierwsza.....	33
Część druga.....	33
4.2. Zakres kolokwium.....	33
5. Literatura.....	34

B

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie mechanizmów fizycznych wykorzystywanych w przyrządach półprzewodnikowych mocy do blokowania wysokich napięć i przewodzenia silnych prądów. Analiza zostanie przeprowadzona na przykładzie najprostszego przyrządu półprzewodnikowego – diody. Niemniej wnioski z niniejszego ćwiczenia stosują się do wszystkich przyrządów półprzewodnikowych mocy. Wynika to z faktu, że każdy z nich posiada w swojej strukturze układ warstw analogiczny do jednej z analizowanych diod.

Przy użyciu prostych modeli zaimplementowanych w arkuszu kalkulacyjnym, zostaną przeanalizowane: dioda mocy bipolarne PIN oraz dioda mocy unipolarna SBD (ang. *Schottky Barrier Diode*, dioda Schottky'ego). Dla każdej z nich określony zostanie wpływ parametrów technologicznych struktury półprzewodnikowej na właściwości elektryczne. Obie diody zostaną następnie porównane ze sobą pod względem wytrzymałości napięciowej i prądowej.

Dla uproszczenia rozważane będą wyłącznie parametry warstwy słabo domieszkowanej jako kluczowej dla działania przyrządów półprzewodnikowych mocy: szerokość, koncentracja domieszek i (dla przyrządu bipolarnego) czas życia nośników. Stany blokowania i przewodzenia będą rozważane oddzielnie, jednak końcowe wnioski zostaną wyciągnięte z uwzględnieniem obu.

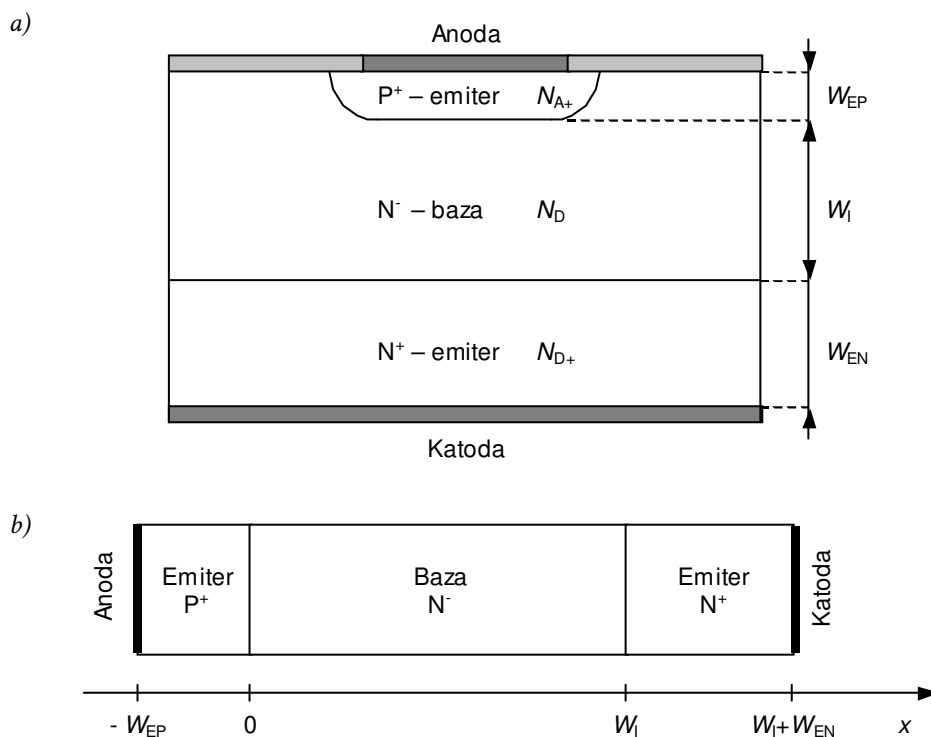
Wykorzystanie modeli i narzędzi komputerowych umożliwi wirtualne przebadanie wielu przyrządów o dowolnie zdefiniowanych parametrach technologicznych, w krótkim czasie i bez konieczności użycia wysokiej klasy sprzętu pomiarowego niezbędnego w badaniach materiałów półprzewodnikowych w skali atomowej.

2. Diody mocy

2.1. Dioda PIN

2.1.a. Budowa

Dioda o strukturze PIN jest najprostszym przyrządem wysokonapięciowym (tj. zawierającym słabo domieszkowaną warstwę o dużych wymiarach geometrycznych) ze złącem PN. Strukturę takiej diody pokazano na rys. 1a. Jak widać (patrz rys. 1b), jest to struktura identyczna z rozważaną w instrukcji 0 w paragrafach 5.3 i 6.5. Jak tam powiedziano, jest to najprostsza możliwa struktura wysokonapięciowa. Realizacja struktury dwuwarstwowej P^+N^- jest bowiem niemożliwa ze względu na pasożytnicze złącze Schottky'ego.



Rys. 1. Dioda mocy o strukturze PIN ($P^+N^-N^+$): a) przekrój; b) uproszczenie jednowymiarowe

Dioda PIN zawiera, zgodnie z nazwą, trzy warstwy: P – emiter P^+ (niekiedy otoczony dodatkową warstwą P), I – bazę N^- oraz N – emiter N^+ . Teoretycznie jest możliwe skonstruowanie diody, w której warstwa I będzie typu P^- , jednak diody takie posiadają dużo gorsze własności dynamiczne i w związku z tym raczej nie są produkowane.

Ścisłe rzecz biorąc, litera „I” oznacza warstwę nie domieszkowaną (samoistną, ang. *intrinsic*). Skrót PIN jest jednak powszechnie przyjęty dla struktur z bazą domieszkowaną na tyle słabo, że nie wpływa na własności przyrządu w stanie przewodzenia, można ją więc traktować jak półprzewodnik samoistny. Mimo to niekiedy dla ścisłości mówi się o diodach PvN ($P^+N^-N^+$) lub PπN ($P^+P^-N^+$).

Zwróćmy uwagę na istotne różnice między warstwą bazy N^- i emiterami P^+ i N^+ :

- 1) w domieszkowaniu: typowe wartości to N_D rzędu 10^{13} – 10^{14} cm^{-3} oraz N_{A+} i N_{D+} rzędu 10^{18} – 10^{21} cm^{-3} ;
- 2) w rozmiarach: wymiar wzdłużny (względem podstawowego kierunku przepływu prądu) jest rzędu 50–500 μm dla bazy (W_I) i rzędu 10–80 μm dla emitera P^+ (W_{EP} ; emiter N^+ zależnie od rozwiązania może mieć różne wymiary).

Powody takich a nie innych parametrów warstw powinny być już oczywiste po lekturze instrukcji 0 (par. 5.2 i 6.5). **Niski poziom domieszkowania bazy i jej duże wymiary są niezbędne do zapewnienia wysokiej wytrzymałości napięciowej. Z kolei obecność silnie domieszkowanych emiterów umożliwia przewodzenie dużych prądów przy niskim napięciu odłożonym na diodzie dzięki mechanizmowi modulacji konduktywności bazy.**

Wymiary emiterów nie są kluczowym problemem w działaniu diody PIN, gdyż wysoki poziom domieszkowania powoduje, że ich rezystancja jest zanedbywalnie mała dla każdej realnej szerokości warstwy. W związku z tym mogą one mieć zarówno bardzo małe (rzędu 10 μm), jak i stosunkowo duże (powyżej 100 μm) wymiary.

Taka a nie inna konstrukcja diody ma istotny wpływ na jej działanie, zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych.

2.1.b. Stan przewodzenia

Stan przewodzenia występuje wtedy, gdy do diody przyłożone jest dodatnie napięcie anoda-katoda, o wartości pozwalającej na polaryzację złącza P^+N^- w kierunku przewodzenia.

Poziom domieszkowania bazy N_D jest stosunkowo niski. Taka sama byłaby koncentracja wolnych elektronów mogących uczestniczyć w przewodzeniu prądu przez bazę, co przełożyłoby się na dużą rezystywność (patrz instrukcja 0, par. 6.1.f). **Uniemożliwiłoby to przewodzenie dużych prądów**, gdyż przy dużej rezystancji moc wydzielana w diodzie byłaby zbyt wysoka.

Dlatego właśnie konieczna jest obecność dwóch warstw silnie domieszkowanych, będących w stanie przewodzenia **źródłem nośników nadmiarowych wstrzykiwanych (emitowanych) do bazy**. Ze względu na tę funkcję, warstwy te nazywa się emiterami. Wstrzykiwanie nośników nadmiarowych powoduje **modulację konduktywności bazy** (patrz instrukcja 0, par. 6.5.f) i znaczne obniżenie jej rezystancji w stosunku do wynikającej z domieszkowania.

Przepływ prądu przewodzenia I_F przez diodę powoduje odłożenie się na niej pewnego napięcia U_F . Składają się na nie spadki potencjału na kolejnych obszarach.

1. **Spadki potencjału na warstwach emiterów P^+ i N^+** wynikają tylko z mechanizmu dryftu, gdyż można założyć, że w tych warstwach nie zachodzi dyfuzja (patrz instrukcja 0, par. 6.4). W związku z tym (patrz instrukcja 0, par. 6.1)

$$\begin{aligned} U_{EN} &= \rho_{N^+} W_{EN} J \\ U_{EP} &= \rho_{P^+} W_{EP} J \end{aligned} \quad (2.1)$$

gdzie ρ – rezystywność warstwy

$$\begin{aligned} \rho_{N^+} &= (e\mu_n N_{D^+})^{-1} \\ \rho_{P^+} &= (e\mu_p N_{A^+})^{-1} \end{aligned} \quad (2.2)$$

zaś J – gęstość przewodzonego prądu

$$J = \frac{I_F}{A} \quad (2.3)$$

gdzie A – pole powierzchni przekroju diody (prostopadłego do kierunku przewodzenia prądu).

Ponieważ koncentracje domieszek N_{D+} i N_A są wysokie w porównaniu z koncentracją nośników w bazie, więc napięcia odłożone na emiterach są **stosunkowo niewielkie i można je zaniedbać**.

2. **Spadek potencjału na złączu P⁺N⁻** wyraża się zależnością (instrukcja 0, par. 6.2)

$$U_{JP} = U_T \ln \left(\frac{\Delta p_n|_{JP} \cdot N_D}{n_i^2} \right) = U_T \ln \left(\frac{\Delta p_n(0) \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.4)$$

przy czym potencjał termiczny wyraża się zależnością

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (2.5)$$

gdzie k – stała Boltzmanna, T – temperatura, e – ładunek elektronu.

Koncentracja dziur nadmiarowych przy złączu $\Delta p(0)$ wyraża się wzorem (patrz instrukcja 0, par. 6.5)

$$\Delta p(0) = J \frac{\sqrt{D_a \tau}}{2e} \frac{D_n^{-1} + D_p^{-1} \cosh(W_1 / L_a)}{\sinh(W_1 / L_a)} \quad (2.6)$$

gdzie D_a – ambipolarna stała dyfuzji (kombinacja ruchliwości obu typów nośników oraz potencjału termicznego), τ – czas życia nośników mniejszościowych w bazie, L_a – droga dyfuzji

$$L_a = \sqrt{D_a \tau} \quad (2.7)$$

Jak wskazaliśmy w instrukcji 0, wpływ obu funkcji hiperbolicznych na wynik z dobrym przybliżeniem się kompensuje; wyniki jest więc narzucony przez pierwszy czynnik. Tym samym napięcie U_{JP} jest tym większe, im większa gęstość przewodzonego prądu oraz im dłuższy czas życia nośników mniejszościowych.

3. **Spadek potencjału na bazie** wyraża się zależnością (instrukcja 0, par. 6.6)

$$U_I = \frac{2\pi k_\mu}{(k_\mu + 1)^2} U_T \exp \left(\frac{W_1}{2\sqrt{D_a \tau}} \right) \quad (2.8)$$

gdzie

$$k_\mu = \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (2.9)$$

Przy wystarczająco dużej szerokości W_1 , w idealnym przypadku wynik nie zależy od gęstości prądu, natomiast jest rosnącą funkcją szerokości bazy W_1 i malejącą funkcją czasu życia nośników τ .

4. **Spadek potencjału na złączu N⁻N⁺** wyraża się zależnością (patrz instrukcja 0, par. 6.3)

$$U_{JN} = U_T \ln\left(\frac{\Delta n|_{JN}}{N_D}\right) = U_T \ln\left(\frac{\Delta n(W_I)}{N_D}\right) = U_T \ln\left(\frac{\Delta p(W_I)}{N_D}\right) \quad (2.10)$$

Przypomnijmy, że równość koncentracji nośników nadmiarowych obu typów wynika z założenia neutralności elektrycznej obszaru składowania ładunku (patrz instrukcja 0, par. 6.5). Koncentracja dziur nadmiarowych na złączu wyraża się zależnością (patrz instrukcja 0, par. 6.5)

$$\Delta p(W_I) = J \frac{\sqrt{D_a \tau} D_n^{-1} \cosh(W_I / L_a) + D_p^{-1}}{2e \sinh(W_I / L_a)} \quad (2.11)$$

Wynika stąd, że – tak jak w przypadku złącza P⁺N⁻ – powyższe napięcie jest tym większe, im większa gęstość przewodzonego prądu oraz im dłuższy czas życia nośników mniejszościowych. Ma ono jednak zawsze mniejszą wartość, co wynika z typowego rzędu wielkości parametrów pod logarytmem.

Całkowity spadek potencjału na diodzie w stanie przewodzenia, czyli napięcie odłożone między anodą i katodą przez przepływający prąd, wyraża się sumą składników przeanalizowanych wyżej:

$$U_F = U_{EP} + U_{JP} + U_I + U_{JN} + U_{EN} \quad (2.12)$$

2.1.c. Stan zaworowy oraz struktury bez i z przebiciem skośnym

W przypadku diody PIN blokowanie napięcia wstecznego realizowane jest przez niesymetryczne złącze P⁺N⁻. Było już ono analizowane szczegółowo w instrukcji 0 (zob. par. 5.2).

Jak wiadomo (zob. par. 5.3 tamże), struktura taka może być wykonana w wersji z szeroką bazą (ang. *wide base*) – bez przebicia skośnego, lub z wąską bazą (ang. *narrow base*) – z przebiciem skośnym. Według jednej z klasyfikacji pierwszy typ określany jest jako *non-punch-through* (NPT), zaś drugi – jako *punch-through* (PT). Istnieje jednak również inna definicja tych pojęć, odwołująca się nie do występowania przebicia skośnego podczas pracy, ale do *odporności* na to przebicie (zob. par. 5.3 w instrukcji 0). Jeżeli przyjąć to drugie podejście, to każda dioda PIN jest przyrządem PT, gdyż z układu warstw półprzewodnikowych N⁺N⁻P⁺ wynika, że każdy taki przyrząd jest niewrażliwy na przebicie skośne. Z powodu tej niejednoznaczności, w niniejszej instrukcji będziemy unikać terminów NPT i PT. Z braku innego skrótu, będą one występować jedynie w indeksach symboli, gdzie należy je interpretować zgodnie z pierwszą definicją, tj.: „pt” – sam stan przebicia skośnego lub przyrząd, w którym stan ten występuje; „npt” – przyrząd, w którym stan ten nie występuje.

Ogólnie rzecz biorąc, projektując diodę mocy z góry zakłada się, czy ma być to struktura z występowaniem przebicia skośnego czy bez. Kryterium wyboru stanowią tutaj wymagania co do pracy diody w stanie przewodzenia i stanach dynamicznych (wyłączania, załączania). Głównym, choć nie jedynym zagadnieniem jest w tym przypadku czas życia nośników w bazie, którego wpływ na działanie struktury został już przeanalizowany w instrukcji 0 (zob. par. 6.6.b i 6.7.b). W oparciu o tę analizę można dojść do następujących wniosków.

1. Diody bez przebicia skośnego muszą mieć bazę szeroką, tak aby do zjawiska tego nie doszło zanim nie nastąpi przebicie lawinowe. W związku z tym do uzyskania niskiego napięcia w stanie przewodzenia konieczny jest długi czas życia nośników mniejszościowych, zgodnie z zależnością (2.8).
2. Realizacja diody PIN jako przyrządu z przebiciem skośnym umożliwia skrócenie bazy, dzięki czemu – zgodnie ze wzorem (2.8) – może ulec zmniejszeniu napięcie w stanie przewodzenia. Najczęściej jednak ze struktury o wąskiej bazie korzysta się w ten sposób, że jednocześnie odpowiednio skraca się czas życia. Przez to wprowadzenie napięcia w stanie przewodzenia pozostaje niezmiennione, ale uzyskujemy skrócenie czasów przełączania.

Analiza obu powyższych czynników prowadzi do wniosku, że dla uzyskania dużej szybkości przełączania korzystne jest projektowanie struktur z przebiciem skośnym, w których można

stosować małe wartości τ pod warunkiem zmniejszenia W_j . Natomiast struktury bez przebicia skośnego będą projektowane do tych zastosowań, w których szybkie załączanie i wyłączanie przyrządu ma znaczenie drugorzędne. Widać tu jednocześnie niekorzystną sprzeczność między wymaganiem dużej szybkości przełączania (krótki czas życia) a wymaganiem niskiego napięcia w stanie przewodzenia (długi czas życia).

Należy wiedzieć, że diody o wąskiej i o szerokiej bazie różni nie tylko sama szerokość bazy, ale i cała technologia wytwarzania. W przyrządach bez przebicia skośnego warstwę N^- o bardzo dużej grubości stanowi zwykle podłoże, w którym poprzez dyfuzję od dwóch stron wytwarzane są warstwy emiterowe. Profil domieszkowania nie jest w tej strukturze dokładny, więc i napięcie przebicia nie może być dokładnie przewidziane. Inna wada to trudny do kontrolowania czas życia nośników w bazie.

W przyrządach z przebiciem skośnym baza N^- jest cieńsza, może więc być wykonana w dokładniejszym procesie epitaksji (patrz instrukcja 0, par. 4.3.c), którą przeprowadza się na podłożu N^+ stanowiącym emiter. Natomiast emiter P^+ jest zwykle wykonywany w drodze implantacji jonów. Jako że epitaksja i implantacja jonów są procesami technologicznymi o dużo większej dokładności niż dyfuzja, parametry diod z przebiciem skośnym – takie jak wytrzymałość napięciowa i czas wyłączania – mogą być precyzyjnie kontrolowane.

2.2. Dynamiczne właściwości diod PIN

2.2.a. Załączanie

Załączanie diody PIN nie jest procesem bardzo skomplikowanym. Wpływa jednak na działanie układów poprzez swój czas trwania.

Przejście samego złącza P^+N^- w stan przewodzenia, i tym samym umożliwienie przepływu prądu przez diodę, trwa stosunkowo krótko. Jednakże **w tym momencie diody nie można jeszcze uznać za w pełni zamknięty łącznik półprzewodnikowy**. Łącznik taki powinien się bowiem charakteryzować niską rezystancją. Tymczasem koncentracja nośników w bazie jest początkowo bardzo mała – równa koncentracji domieszek. Oznacza to dużą rezystywność i – w połączeniu z dużą szerokością bazy – wysoką rezystancję. Objawia się to **znacznym napięciem odkładanym na bazie**.

W zależności od wytrzymałości napięciowej diody i natężenia płynącego przez nią prądu, szczytowe napięcie $U_{F(pk)}$ może wynosić nawet kilkadziesiąt woltów (dla diod występujących w układach badanych w laboratorium jest to kilka woltów). Dopiero po wypełnieniu całej bazy przez nośniki nadmiarowe w odpowiedniej liczbie, napięcie na diodzie zmniejsza się do niskiej wartości ustalonej U_F (w diodach mniejszej mocy – niewiele większej od napięcia na samym złączu P^+N^-) i załączanie diody uznajemy za zakończone.

Opisane wyżej zjawisko jest niekorzystne, gdyż **związane jest z nim wydzielanie dużej mocy**, wynikającej z przepływu prądu przy znacznym napięciu. Dodatkowa moc czynna jest oczywiście tym większa, im większe napięcie odłożone na diodzie i im dłuższy czas trwania procesu załączania. W związku z tym dąży się do tego, aby – przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości napięciowej – baza posiadała jak najwyższą koncentrację domieszek (niska rezystywność) i jak najmniejszą szerokość (krótki czas wypełnienia przez nośniki nadmiarowe).

Załączanie diody ma duży wpływ na działanie tych układów, w których dioda przejmuje płynący już wcześniej prąd z innej gałęzi (tzw. **komutacja prądu** lub *przełączanie twarde*, ang. *hard switching*), a więc pojawia się on w niej natychmiast po przejściu złącza P^+N^- w stan przewodzenia. Natomiast w układach, w których przed załączeniem diody prąd nie płynie (tzw. *przełączanie miękkie*, ang. *soft switching*), zwykle indukcyjności pasożytnicze na tyle spowalniają jego narastanie, że kiedy osiąga on znaczącą wartość, rezystancja bazy jest już niska.

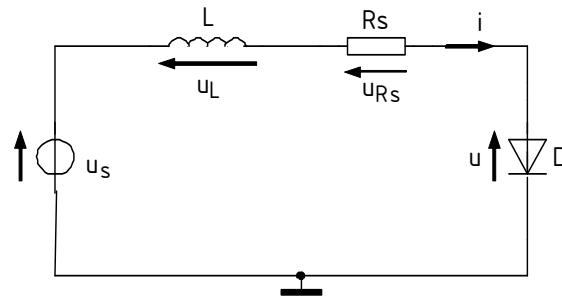
2.2.b. Wyłączanie

Wyłączanie diody PIN jest dużo bardziej złożone. Jest ono inicjowane przez przyłożenie ujemnego napięcia anoda-katoda o pewnej wartości $-U_R$ (teoretycznie wystarczyłoby napięcie dodatnie mniejsze od progowego, jednak taki przypadek w praktycznych układach nie występuje).

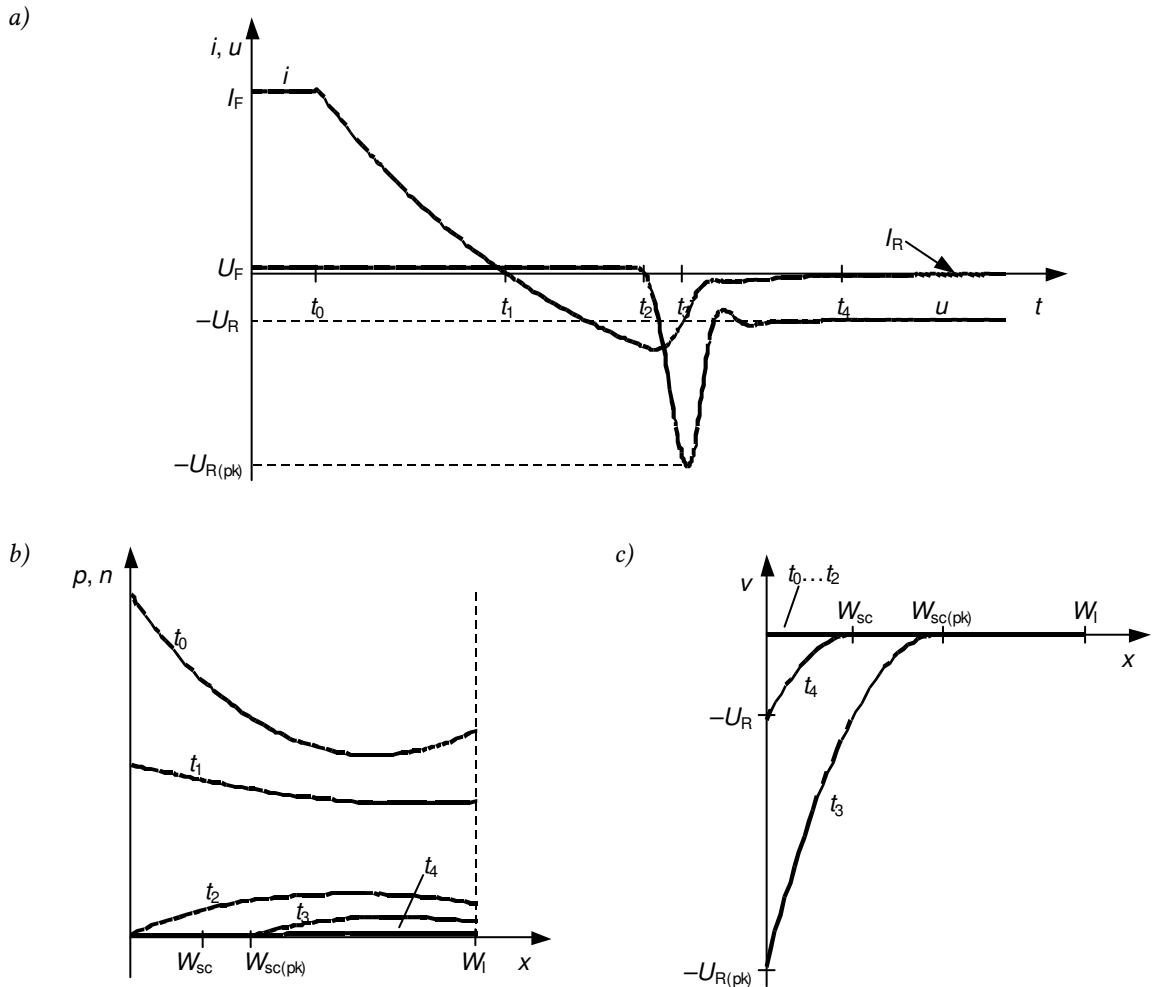
Jak stwierdziliśmy (patrz instrukcja 0, par. 6.7.b), wyłączanie polega głównie na **usunięciu z bazy wszystkich nośników nadmiarowych, które do tej pory umożliwiły przepływ prądu**. Na czas trwania tego procesu wpływ mają przede wszystkim trzy czynniki:

- 1) **liczba nośników do usunięcia** będąca rosnącą funkcją parametrów W_B , τ , I_F – im więcej nośników, tym dłużej trwa ich usuwanie prądem wstecznym;
- 2) **parametry obwodu zewnętrznego** – przepływ większego prądu wstecznego oznacza usunięcie nośników ładunku w krótszym czasie;
- 3) **czas życia nośników mniejszościowych w bazie** – im dłuższy czas życia, tym wolniej następuje redukcja liczby nośników na drodze rekombinacji.

W analizie wyłączania należy uwzględnić, że każdy układ mocy zawiera indukcyjność – rzeczywistych elementów biernych lub pasożytniczą. Tak więc uogólniony układ pracy diody można przedstawić w postaci jak na rys. 2. Przebiegi prądu i i napięcia na diodzie u w tym układzie podczas wyłączania diody przedstawia rys. 3a, zaś rys. 3b–c pokazują rozkłady koncentracji nośników i potencjału wzdłuż bazy diody w wybranych chwilach czasowych zaznaczonych na rys. 3a. Z kolei na rys. 4 zobrazowano sytuację w rozważanym obwodzie w poszczególnych etapach. Proces wyłączania omówimy wyróżniając w nim kilka charakterystycznych faz.



Rys. 2. Ogólny układ pracy diody PIN



Rys. 3. Przebieg wyłączenia diody PIN: a) przebiegi prądu i napięcia; b) koncentracja nośników; c) rozkład potencjału (potencjał katody $v_K = 0$)

1. **Do chwili t_0** napięcie wymuszające u_s ma pewną stałą, dodatnią wartość U_s , co wymusza przepływ stałego prądu przewodzenia o natężeniu (zob. rys. 4a)

$$I_F = \frac{u_{R_s}}{R_s} = \frac{U_s - u_L - u}{R_s} \quad (2.13)$$

Napięcie u_L jest zerowe zgodnie z równaniem cewki

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.14)$$

Z kolei napięcie na diodzie u stanowi niewielki spadek potencjału w stanie przewodzenia U_F . Zazwyczaj $U_F \ll U_s$, co pozwala na dokonanie przybliżenia

$$I_F \approx \frac{U_s}{R_s} \quad (2.15)$$

2. **W chwili t_0** napięcie wymuszające u_s zmienia się na ujemne $-U_R$. Zgodnie z równaniem (2.14), szybkość zmian prądu narzucona jest przez cewkę:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{-U_R - u_{R_s} - u}{L} = \frac{-U_R - iR_s - U_F}{L} \quad (2.16)$$

Zakładając, że $U_F \ll U_R$, powyższe upraszcza się do

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{-U_R - iR_s}{L} \quad (2.17)$$

Ponieważ – jak widać – napięcie na cewce jest ujemne (por. rys. 4b), to ujemna jest także pochodna prądu. Oznacza to, iż wartość prądu zmniejsza się w czasie. Szybkość tych zmian nieco spada z upływem czasu, jako że napięcie na rezystancji iR_s zmniejsza się proporcjonalnie do prądu.

W związku ze spadkiem wartości prądu, koncentracja nośników nadmiarowych w bazie zmniejsza się. Pozostaje ona jednak znacząca, dlatego złącze P^+N^- znajduje się nadal w stanie przewodzenia. Ponieważ baza wciąż jest wypełniona nośnikami nadmiarowymi, jej rezystywność jest niska. Tak więc napięcie na diodzie u pozostaje nieznaczące w stosunku do wymuszenia U_R (rzędu U_F) i nie ma wpływu na zjawiska w obwodzie.

3. **W chwili t_1** prąd spada do zera, jednak w całej bazie diody wciąż obecne są nośniki nadmiarowe. Dioda nadal może więc przewodzić, a spadek potencjału na niej pozostaje niski. Równość (2.17) pozostaje więc w mocy, a przebieg prądu nie zmienia charakteru i kontynuuje on spadek po dotychczasowej krzywej. Obecnie przyjmuje jednak wartości ujemne, co oznacza, że jego faktyczny zwrot jest przeciwny do strzałkowania na rys. 2 (zob. rys. 4c).

Jednakże **w fazie t_1-t_2** koncentracja nośników spada szybciej niż do tej pory. Bowiem oprócz tego, że nośniki nadmiarowe rekombinują, zamiast zmniejszania intensywności wstrzykiwania (wskutek zmniejszania się gęstości prądu) obserwujemy wręcz usuwanie ich z bazy do emiterów przez prąd wsteczny. (Jeżeli odnieść się do rysunku w par. 6.5.a instrukcji 0, to prąd wsteczny i_R płynie w lewo, w wyniku czego – odwrotnie niż w procesie dyfuzji – dziury poruszają się również w lewo, tj. do emitera P^+ , a elektrony – w prawo, tj. do emitera N^+ .)

4. **W chwili t_2** koncentracja nośników przy złączu P^+N^- spada do zera. Jak wynika z dokładnej zależności opisującej napięcie na złączu PN w funkcji koncentracji nośników nadmiarowych (patrz instrukcja 0, par. 6.2),

$$U_{JP} = U_T \ln \left(\frac{\Delta p_n(0) \cdot N_D}{n_i^2} + 1 \right) = U_T \ln 1 \quad (2.18)$$

napięcie to osiąga wówczas wartość bliską zera.

W fazie t_2-t_3 kontynuowane jest usuwanie nośników z bazy przez prąd wsteczny, wskutek czego od strony złącza P^+N^- tworzy się coraz szerszy obszar pozbawiony nośników – obszar ładunku przestrzennego (patrz rys. 3b). Zgodnie z zależnościami (patrz instrukcja 0, par. 5.1)

$$-\frac{dV(x)}{dx} = E(x) \quad (2.19)$$

z obecnością pola elektrycznego w tym obszarze związane jest ujemne napięcie (patrz rys. 3c). W pewnej chwili t_3 obszar ładunku przestrzennego rozciąga się na swoją maksymalną szerokość $W_{sc(pk)}$, a napięcie na nim osiąga swoją wartość szczytową $-U_{R(pk)}$ (rys. 4d) zgodnie z zależnością (patrz instrukcja 0, par. 5.2)

$$|u| = \frac{eN_D}{2\epsilon} W_{sc}^2 \quad (2.20)$$

Ujemne napięcie na diodzie osiąga w tej fazie znaczące wartości, a jego wartość szczytowa $U_{R(pk)}$ zazwyczaj przekracza napięcie źródła U_R . Kiedy zostaje spełniony warunek

$$|u| > |-U_R - iR_s|, \quad (2.21)$$

(przypomnijmy, że obecnie $i < 0$, co pomniejsza prawą stronę nierówności, a więc napięcie u nie musi być nawet większe od U_R), wówczas, zgodnie z równaniem (2.16),

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L} = \frac{(-U_R - iR_s) - u}{L} > 0 \quad (2.22)$$

co oznacza, że kierunek zmian prądu ulega odwróceniu. Obserwujemy to w pewnym momencie między t_2 i t_3 .

Nie dochodzi już jednak do ponownego przejścia prądu przez zero. Prąd ma bowiem nadal wartość ujemną, co oznacza kontynuację przyspieszonego usuwania nośników z bazy. Pole elektryczne w powstałym uprzednio obszarze ładunku przestrzennego przeciwdziała natomiast ich dyfuzji w przeciwnym kierunku. Oba te mechanizmy prowadzą do stopniowego wygasania przepływu prądu przez diodę.

5. W ostatniej **fazie** t_3-t_4 , w konsekwencji mechanizmu opisanego wyżej, prąd wsteczny diody osiąga ostatecznie swoją wartość ustaloną I_R . Jest to prąd upływu złącza, wynikający wyłącznie ze stałej generacji termicznej par dziura-elektron w obszarze ładunku przestrzennego i ich usuwania z tego obszaru przez pole elektryczne w kierunku przeciwnym do przyłożonego ujemnego napięcia. Pod koniec stanu przejściowego prąd maleje wyraźnie wolniej, gdyż przy małej wartości prądu wstecznego liczba nośników w bazie spada powoli.

Natężenie prądu upływu można w uproszczeniu uznać za zerowe. W takim wypadku zerowy jest także spadek potencjału na rezystancji R_s . Ponieważ w stanie ustalonym prąd nie zmienia się, więc z równości (2.14) także napięcie na cewce jest zerowe. Stąd wartość ustalona napięcia na diodzie wynosi (patrz rys. 4e)

$$u = -U_R \quad (2.23)$$

Szerokość obszaru ładunku przestrzennego ustala się na poziomie W_{sc} odpowiadającym temu napięciu. Jeżeli w diodzie miałoby miejsce przebicie skrośne, to $W_{sc} = W_i$. Natomiast w rozważanym tu przykładzie szerokość obszaru ładunku przestrzennego wynika z przytoczonej wyżej zależności (2.20).

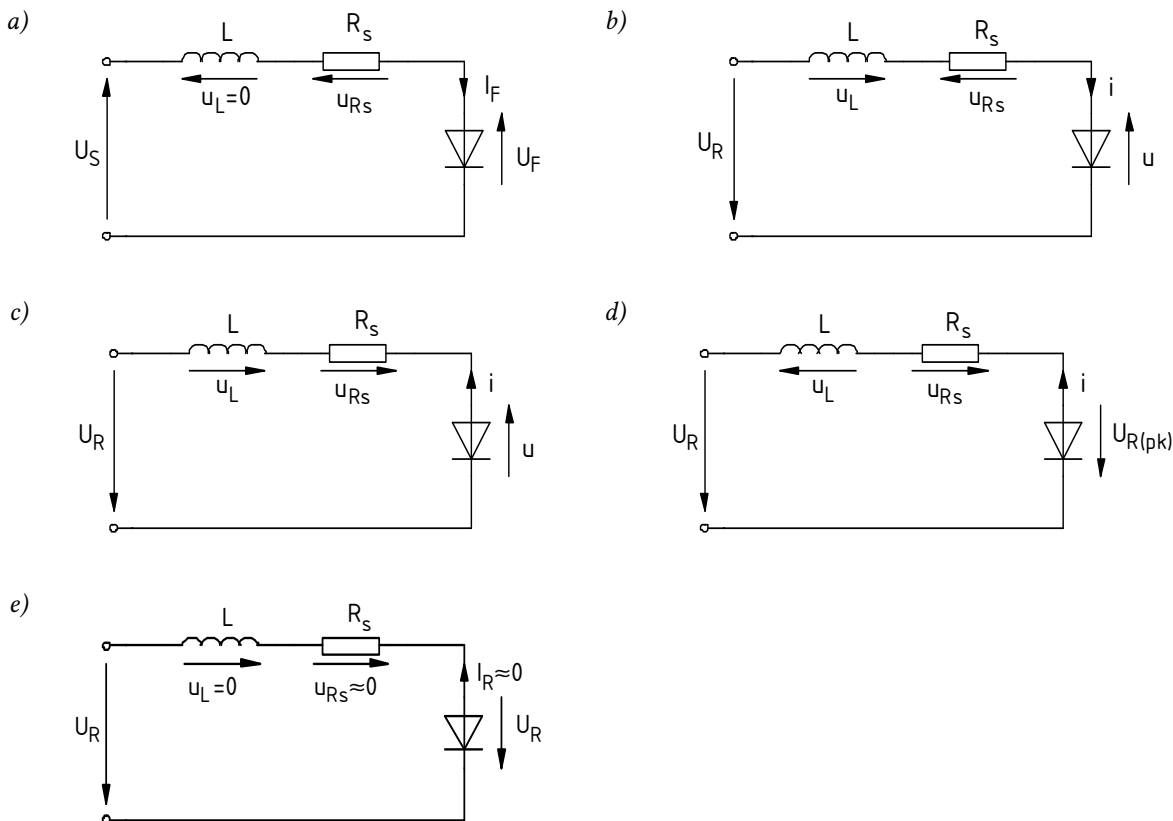
W zależności od parametrów obwodu, proces dochodzenia do stanu ustalonego może mieć charakter oscylacyjny. Widać to na rys. 3, gdzie oscylacje napięcia wynikają z dynamiki nośników w bazie powiązanej z przebiegiem prądu i

skutkującej okresowym poszerzaniem i zwężaniem obszaru ładunku przestrzennego.

Opisany przebieg wyłączenia diody PIN skutkuje znacznym **ograniczeniem częstotliwości pracy tego przyrządu**. Wynika ono:

- 1° co oczywiste – z dużej wartości samego **czasu wyłączenia**,
- 2° ale również – co istotniejsze – z dużej **mocy strat**.

Jak widać na rys. 3, przepływowi prądu wstecznego, którego wartość chwilowa może być rzędu prądu przewodzenia I_F (a nawet go przekraczać), towarzyszy wysokie napięcie wsteczne o wartości szczytowej często kilkakrotnie wyższej od ustalonej U_R . Oznacza to wydzielanie dużej mocy chwilowej. Analogiczny, choć z reguły nie krytyczny, jest wpływ przebiegu załączania diody.



Rys. 4. Sytuacja w rozważanym obwodzie wyłączenia diody PIN (oznaczono rzeczywisty kierunek prądu i napięcia – oznaczenia „ u ” i „ i ” należy traktować jako wartości bez znaku): a) faza 1 – stan ustalony przewodzenia (do chwili t_0); b) faza 2 (t_0-t_1); c) faza 3 – po zmianie kierunku prądu (t_1-t_2); d) maksimum napięcia wstecznego po wyjściu złącza ze stanu przewodzenia i zapoczątkowaniu zaniku prądu w fazie 4, chwila t_3 ; e) stan ustalony zaporowy (po chwili t_4)

2.2.c. Parametry stanu wyłączenia

Jak wynika z powyższej analizy, w przypadku diod mocy wyłączenie jest procesem bardziej złożonym i krytycznym niż załączanie. Wiąże się to z charakterem zjawisk fizycznych zachodzących wewnątrz diody, a dotyczących nadmiarowych nośników ładunku zmagazynowanych w warstwie słabo domieszkowanej w stanie przewodzenia. Dodatkowy wpływ ma oddziaływanie diody z obwodem zewnętrznym. W ich konsekwencji obserwowany jest przepływ prądu wstecznego, przepięcia i oscylacje. Skutki tych procesów nie ograniczają się tylko do samego czasu trwania stanu wyłączenia, ale obejmują również straty mocy w diodzie i sąsiednich elementach (a więc sprawność układu) oraz emisję zaburzeń elektromagnetycznych wywołaną dużymi stromościami napięcia i prądu (a więc niezawodność urządzenia i jego kompatybilność elektromagnetyczną).

Z powyższych powodów istotna jest możliwość liczbowego opisu procesu wyłączenia. Należy przy tym spodziewać się, że – ze względu na wspomniane oddziaływanie przyrządu z obwodem zewnętrznym – na wartości parametrów dynamicznych wpływ mają nie tylko właściwości samej

diody, ale również układu pracy. Do szczególnie istotnych warunków zewnętrznych należą (patrz rys. 5a):

- 1) prąd przewodzenia I_F ,
- 2) napięcie blokowania U_R ,
- 3) stromość opadania prądu przewodzenia di_F/dt .

Należy zwrócić uwagę, że dwa pierwsze z powyższych parametrów odnoszą się do wszystkich przyrządów półprzewodnikowych mocy, gdyż zawsze są narzucone przez obwód zewnętrzny. Jednakże szybkość wyłączenia w przypadku tranzystorów zależy zwykle od parametrów obwodu sterowania, zaś w przypadku diod sytuacja jest inna. Ponieważ są to przyrządy niesterowalne, szybkość wyłączenia prądu diody jest najczęściej narzucona przez obwód zewnętrzny. Jest ona wówczas równa szybkości załączania prądu tego przyrządu, który przejmuje prąd od dotychczas przewodzącej diody. Taka sytuacja występuje między innymi w obwodzie symulacyjnym wykorzystywanym w niniejszym ćwiczeniu.

Powyzsze nie oznacza jednak braku wpływu właściwości diody na parametry wyłączenia takie jak np. czas trwania tego procesu. Wpływ ten jest wręcz decydujący od chwili przejścia opadającego prądu diody przez zero.

Definicje parametrów dynamicznych stanu wyłączenia diody mocy zgodnie z normą IEC 60747-2 zaznaczono graficznie na rys. 5a. Są to:

- 1) **czas wyłączenia** t_{rr} (ang. *reverse recovery time*), zwany również **czasem odzyskiwania zdolności zaworowej**, na w którym wyróżnia się czas magazynowania t_s (ang. *storage time*) i czas opadania prądu wstecznego t_f (ang. *reverse current fall time*);
- 2) **ładunek przejściowy przy wyłączeniu** Q_{rr} (ang. *reverse recovery charge*) – wartość ładunku usuwanego w czasie t_{rr} , a więc pole zaznaczone kolorem szarym:

$$Q_{rr} = \left| \int_{t_{rr}} i dt \right| \quad (2.24)$$

- 3) **maksymalny prąd wsteczny** $I_{rr(m)}$ (ang. *maximum reverse recovery current*);
- 4) **maksymalne napięcie wsteczne** $U_{rr(m)}$ (ang. *maximum reverse recovery voltage*).

Dokładne określenie chwili zaniku prądu nie jest możliwe. Dlatego jego przebieg w ostatniej fazie aproksymuje się prostą, a za koniec procesu przyjmuje się punkt jej przecięcia z osią czasu. W praktyce wybór punktów określających sieczną bywa inny niż na rys. 5a – producenci diod zamiast progów 90% i 25% wartości szczytowej $I_{rr(m)}$ stosują również 100%, 75% i 50%.

Szczególne znaczenie praktyczne ma ładunek przejściowy Q_{rr} . Ładunek jako całka z prądu względem czasu zawiera w sobie bowiem informację zarówno o wartościach prądu, jak i o czasie jego przepływu. Przyjmując napięcie podczas wyłączenia za stałe i równe U_R , uzyskuje się często wykorzystywany przez inżynierów przybliżone wzory na **energię i moc czynną strat dynamicznych podczas wyłączenia**:

$$W_{off} = \int_{t_{rr}} p dt = \int_{t_{rr}} ui dt \approx U_R \int_{t_{rr}} i dt = U_R \cdot Q_{rr} \quad (2.25)$$

$$P_{off} = \frac{1}{T_s} \int_{t_{rr}} p dt = \frac{W_{off}}{T_s} \approx f_s \cdot U_R \cdot Q_{rr} \quad (2.26)$$

gdzie T_s i f_s oznaczają okres i częstotliwość przełączania, zaś wartości U_R i Q_{rr} są pozbawione znaku.

Z kolei istotność czasów t_s i t_f wynika z faktu, że za ich pomocą można przybliżyć stromości prądowe (por. rys. 5a):

$$\frac{di_F}{dt} \approx \frac{I_{rr(m)}}{t_s} \quad (2.27)$$

$$\frac{di_R}{dt} \approx \frac{I_{rr(m)}}{t_f} \quad (2.28)$$

Im większa stromość zaniku prądu wstecznego w stosunku do stromości opadania prądu, tym większa amplituda generowanego przebiegu. Zależność ta jest w przybliżeniu proporcjonalna, a więc

$$U_{rr(m)} - U_R \approx U_R \cdot \left| \frac{di_R/dt}{di_F/dt} \right| \quad (2.29)$$

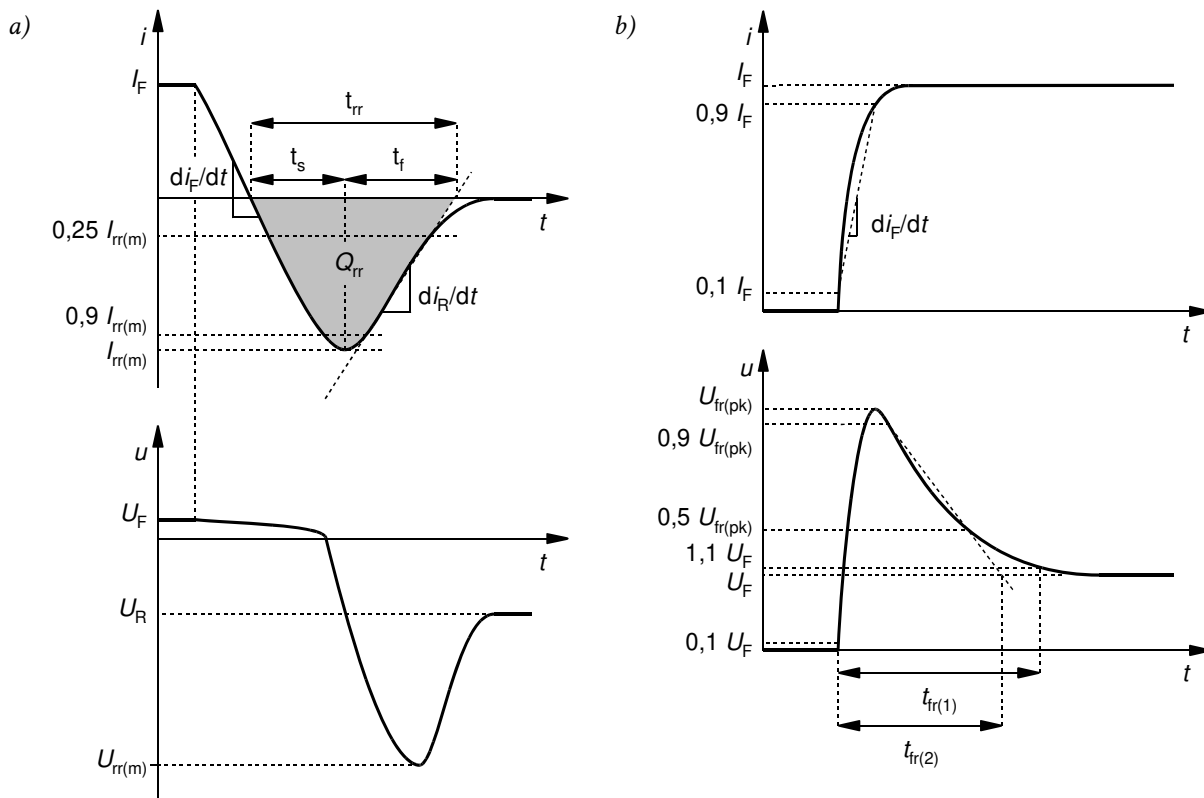
Z powyższych przybliżeń uzyskuje się praktyczny wzór na szczytowe napięcie wsteczne w postaci:

$$U_{rr(m)} = U_R \cdot \left(1 + \left| \frac{di_R/dt}{di_F/dt} \right| \right) \approx U_R \cdot \left(1 + \frac{I_{rr(m)}/t_f}{I_{rr(m)}/t_s} \right) = U_R \left(1 + \frac{t_s}{t_f} \right) = U_R (1 + k_{rrs}^{-1}) \quad (2.30)$$

gdzie

$$k_{rrs} = \frac{t_f}{t_s} \quad (2.31)$$

nazywa się **współczynnikiem łagodności wyłączania** (ang. *reverse recovery softness factor*). Im większa jego wartość, tym wyłączanie przebiega łagodniej w sensie generowanego przebiegu.



Rys. 5. Przebiegi prądu i napięcia diody wraz z definicjami parametrów dynamicznych zgodnie z normą IEC 60747-2: a) wylączenie; b) załączanie

2.2.d. Parametry stanu załączania

Podobnie jak w przypadku wyłączenia, szybkość narastania prądu diody podczas jej załączania jest najczęściej równa szybkości opadania prądu przyrzędu, który jest wówczas wyłączany, a którego prąd przejmuje dioda. Zwykle prąd narasta szybciej niż do warstwy słabo domieszkowanej napływają dodatkowe nośniki z emiterów, co powoduje powstanie na diodzie znaczącego spadku potencjału, jak to opisano w par. 2.2.a. Spadek ten stopniowo zmniejsza się w czasie, w miarę zwiększania się koncentracji nośników nadmiarowych, co przedstawiono na rys. 5b. Ostatecznie osiąga pewną wartość ustaloną U_F , która wynika z charakterystyki statycznej przyrzędu.

Jak widać, proces załączania jest mniej złożony od wyłączenia. Opisują go liczbowo dwa parametry, których definicje zgodnie z normą IEC 60747-2 przedstawiono graficznie na rys. 5b:

- 1) **szczytowe napięcie podczas załączania** $U_{fr(pk)}$ (ang. *peak forward recovery voltage*).
- 2) **czas załączania** t_{fr} (ang. *forward recovery time*), zwany też **czasem odzyskiwania zdolności przewodzenia** – który posiada dwie definicje:
 - metoda wyznaczania oznaczona cyfrą (1) zalecana jest dla przypadków, w których napięcie szczytowe $U_{fr(pk)}$ nie przekracza ok. 10 V,
 - natomiast metoda (2) zalecana jest dla przypadków, w których napięcie szczytowe jest znacząco większe niż ok. 10 V i zastosowanie metody (1) spowodowałoby objęcie odcinka czasu niewspółmiernie długiego w stosunku do stałej czasowej opadania napięcia.

Zależą one od dwóch parametrów obwodu zewnętrznego:

- 1) **prądu przewodzenia** I_F ,
- 2) **stromości narastania prądu przewodzenia** di_F/dt .

W przypadku, gdy dioda wykazuje znaczące napięcie szczytowe $U_{fr(pk)}$, stosowanie definicji czasu t_{fr} przedstawionej na rys. 5b prowadziłoby do objęcia znaczącego odcinka czasu. Wynika to z faktu, że różnica wartości $1,1 \cdot U_F$ i U_F jest bardzo niewielka w porównaniu z różnicą wartości $U_{fr(pk)}$ i U_F . W tym wypadku rozsądniejszym kryterium zakończenia załączania jest zmniejszenie napięcia na diodzie do wartości $U_F + 0,1 \cdot (U_{fr(pk)} - U_F)$, czyli do 10% szczytu napięcia liczonego od poziomu U_F .

Praktyczne wzory przybliżone na **energię i moc czynną strat podczas załączania** można uzyskać po założeniu, że czas narastania prądu jest dużo krótszy od czasu załączania t_{fr} . Odpowiada to przyjęciu, że przez cały czas t_{fr} prąd diody ma wartość I_F . Wówczas

$$W_{on} = \int_{t_{fr}} p \, dt = \int_{t_{fr}} ui \, dt \approx I_F \int_{t_{fr}} u \, dt \quad (2.32)$$

Całka odpowiada polu powierzchni pod przebiegiem napięcia. Przybliżając je trapezem, otrzymuje się

$$W_{on} \approx \frac{1}{2} I_F (U_F + U_{fr(pk)}) t_{fr} \quad (2.33)$$

$$P_{on} = \frac{1}{T_s} \int_{t_{fr}} p \, dt = \frac{W_{on}}{T_s} \approx \frac{1}{2} f_s I_F (U_F + U_{fr(pk)}) t_{fr} \quad (2.34)$$

2.3. Diody ze złączem Schottky'ego

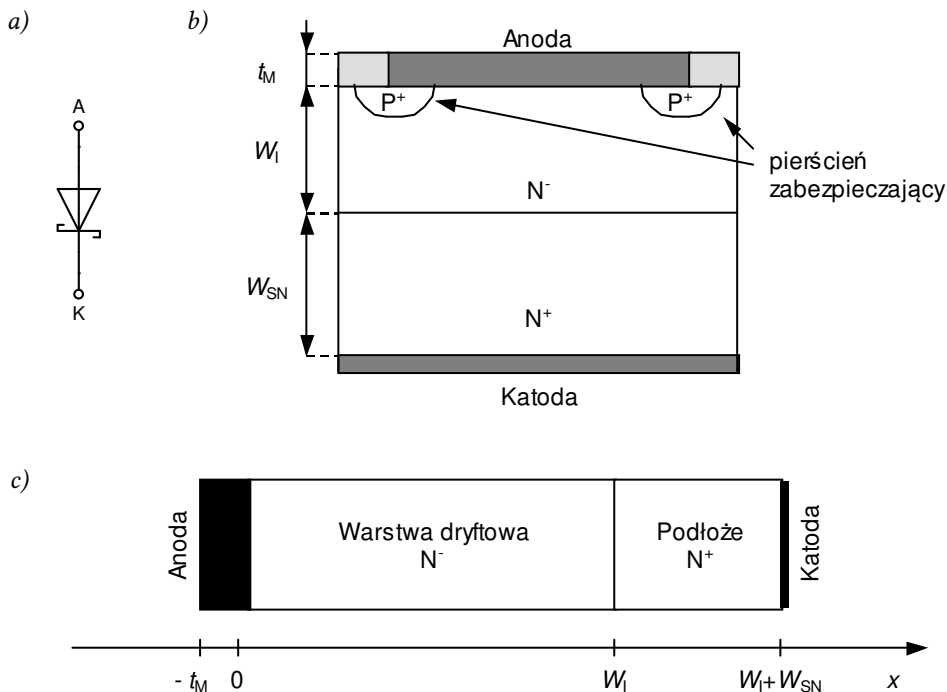
2.3.a. Budowa diody mocy Schottky'ego i stan zaworowy

Dioda PIN jest podstawową strukturą diody mocy (wysokonapięciowej). Należy jednak wiedzieć, że produkowane i stosowane są również diody mocy o innych strukturach.

Diody mocy Schottky'ego zamiast złącza PN posiadają **złącze metal-półprzewodnik** (MN^- lub MP^-). Jak stwierdziliśmy (patrz instrukcja 0, par. 5.4.b i 5.4.d), złącze Schottky'ego może się wytworzyć wyłącznie przy kontakcie metalu ze słabo domieszkowanym półprzewodnikiem. Występowanie takiej warstwy półprzewodnika jest akurat naturalne w przypadku przyrządów wysokonapięciowych, które muszą zawierać słabo domieszkowaną warstwę półprzewodnikową.

W wysokonapięciowej diodzie Schottky'ego, której przekrój przedstawiono na rys. 6b, warstwa słabo domieszkowana N^- posiada dużą szerokość W_I (na rysunku wymiar pionowy) wymaganą dla uzyskania wysokiej wytrzymałości napięciowej. Warstwa ta jest wytwarzana epitaksjalnie na podłożu N^+ o pewnej grubości W_{SN} , co zapewnia z jednej strony zwykły kontakt omowy od strony katody, a z drugiej – pozwala precyzyjnie kontrolować domieszkowanie i rozmiar warstwy N^- , które to parametry mają decydujący wpływ na charakterystyki diody. Grubość metalowej elektrody anody t_M jest rzędu (0,1...1) μm .

Mimo dużej szerokości warstwy słabo domieszkowanej, diody Schottky'ego nie pozwalają na osiągnięcie napięć przebicia wyższych niż 60 V dla prostej struktury MN^-N^+ (patrz instrukcja 0, par. 5.4.c). Napięcia do 100 V można uzyskać dla struktury z pierścieniami zabezpieczającymi typu P^+ , którą to właśnie przedstawia rys. 6b. Struktura taka nieco modyfikuje rozkład pola elektrycznego na krawędziach złącza metal-półprzewodnik. Z drugiej strony unipolarny mechanizm przewodnictwa sprawia, że wytwarzanie diod o bardzo dużych rozmiarach W_I jest niecelowe ze względu na niedopuszczalnie wysokie napięcie w stanie przewodzenia. Zagadnienie to zostanie za chwilę przeanalizowane dokładnie.



Rys. 6. Dioda mocy Schottky'ego: a) symbol według normy PN-EN 60617; b) przekrój struktury z pierścieniem zabezpieczającym; c) uproszczenie jednowymiarowe

2.3.b. Stan przewodzenia

W napięciu odkładanym przez płynący prąd na diodzie Schottky'ego można wyróżnić 4 składowe.

1. **Napięcie na złączu MN^-** wyraża się zależnością (patrz instrukcja 0, par. 6.3.b)

$$U_J = U_T \ln\left(\frac{J}{J_s} + 1\right) \quad (2.35)$$

przy czym prąd nasycenia J_s wynosi

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{\varphi_B}{U_T}\right) \quad (2.36)$$

gdzie A^* – stała Richardsona, φ_B – potencjał bariery energetycznej. Jak więc widać, za pośrednictwem prądu nasycenia napięcie silnie (wykładniczo) zależy od potencjału φ_B . Ten z kolei silnie zależy od użytego metalu i domieszkowania półprzewodnika. Jak powiedzieliśmy w instrukcji 0 (zob. par. 6.3.a), w praktyce stosuje się takie zestawienia, które dają napięcie na złączu MN^- mniejsze niż na typowym złączu P^+N^- – zwykle rzędu 0,3 V. Sam potencjał typowo zawiera się w przedziale (0,6 ...0,8) V. Identyfikacyjnie jak dla złącza P^+N^- , obserwujemy logarytmiczną zależność napięcia od gęstości przewodzonego prądu.

2. **Spadek potencjału na warstwie słabo domieszkowanej N^-** wyraża się zależnością opisującą mechanizm dryftu

$$U_I = \rho_I W_I J \quad (2.37)$$

gdzie ρ_I – rezystywność warstwy słabo domieszkowanej

$$\rho_I = (e\mu_n N_D)^{-1} \quad (2.38)$$

Napięcie to zależy więc liniowo od przewodzonego prądu. Wynika to z faktu, że dioda Schottky'ego jest przyrządem unipolarnym – w jej strukturze nie istnieje emiter, który mógłby dostarczyć nadmiarowych nośników drugiego rodzaju, tj. dziur. Przewodzenie odbywa się więc wyłącznie za pomocą elektronów o koncentracji równej N_D – domieszkowaniu warstwy N^- .

Z tego samego powodu obserwujemy proporcjonalność napięcia U_I do szerokości warstwy słabo domieszkowanej oraz odwrotną proporcjonalność do koncentracji domieszek w tej warstwie. Tymczasem duża wartość W_I i niska wartość N_D są kluczowe dla uzyskania odpowiedniej wytrzymałości napięciowej przyrządu. Wyraźna jest więc sprzeczność między wymaganiem wysokiej wytrzymałości napięciowej a wymaganiem niskiego napięcia w stanie przewodzenia.

3. **Spadek potencjału na podłożu N^+** wyraża się wzorem

$$U_{SN} = \rho_{N^+} W_{SN} J \quad (2.39)$$

gdzie ρ_{N^+} – rezystywność silnie domieszkowanego podłoża

$$\rho_{N^+} = (e\mu_n N_{D^+})^{-1} \quad (2.40)$$

4. **Spadek potencjału na elektrodzie metalowej** wyraża się wzorem

$$U_M = \rho_M t_M J \quad (2.41)$$

gdzie ρ_M – rezystywność metalu

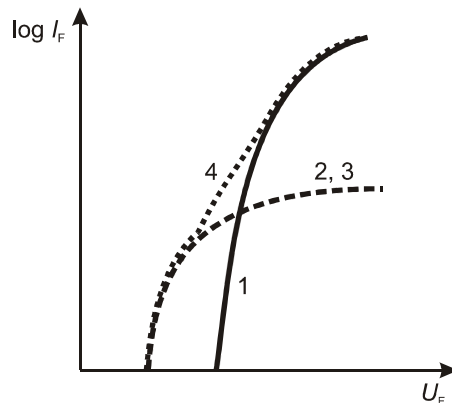
$$\rho_M = (e\mu_n N_M)^{-1} \quad (2.42)$$

Dla najczęściej stosowanego aluminium koncentracja elektronów N_M wynosi $8,48 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, a więc o 1–3 rzędy wielkości więcej niż domieszkowanie warstwy silnie domieszkowanej N_{D+} . Rezystywność jest więc stosunkowo niska, dlatego napięcie na elektrodzie można w praktyce zaniedbać.

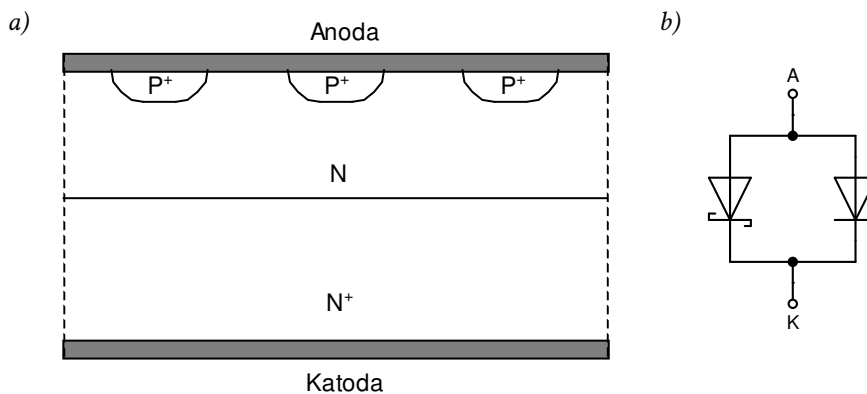
Dla niskich natężeń prądu dominujący jest spadek potencjału na złączu (składnik 1). Wówczas napięcie na diodzie Schottky'ego jest wyraźnie niższe niż na diodzie PIN o takich samych wymiarach i domieszkowaniu. Jak stwierdziliśmy, składnik ten rośnie ze wzrostem prądu w taki sam sposób, jak w diodzie PIN.

Jednakże składnik 2 – spadek potencjału na warstwie N^- wykazuje liniową zależność od gęstości prądu, podczas gdy w przypadku idealnej diody PIN zależność taka w ogóle nie istnieje (a w rzeczywistości jest słaba). W wyniku tego, w miarę wzrostu natężenia prądu, **napięcie odkładane na warstwie słabo domieszkowanej staje się porównywalne, a w końcu wyższe od napięcia odkładanego na złączu**. W wyniku tego napięcie na diodzie Schottky'ego przy danym natężeniu prądu przewyższa napięcie na analogicznej diodzie PIN, co pokazuje rys. 7.

W diodzie PIN niska koncentracja domieszek w bazie N^- nie ma znaczenia, jako że przewodzenie jest bipolarne z wykorzystaniem mechanizmu modulacji konduktywności bazy. Natomiast w diodzie Schottky'ego ciężar przewodnictwa (unipolarnego) przez warstwę N^- spoczywa na większościowych elektronach, których koncentracja jest niska.



Rys. 7. Napięcie na przewodzącej diodzie w zależności od natężenia prądu (skala logarytmiczna) dla różnych konstrukcji diod mocy: 1 – dioda PIN; 2 – dioda Schottky'ego; 3 – dioda JBS; 4 – dioda MPS



Rys. 8. Diody JBS i MPS: a) przekrój pokazujący ideę obu struktur; b) schemat zastępczy diody MPS

2.3.c. Diody kombinowane

Istnieje grupa diod o różnych nazwach, opartych o równoległe połączenie diody Schottky'ego i diody P^+NN^+ lub podobnej (zob. rys. 8b). Najpopularniejsze w tej grupie diody JBS (ang. *junction barrier Schottky* 'dioda Schottky'ego z barierą złączową') i MPS (ang. *merged power Schottky* 'kombinowana dioda mocy Schottky'ego') powstają przez wytworzenie w warstwie N, w drodze dyfuzji, wysp typu P^+ (zob. rys. 8a). W ten sposób powstaje przyrząd, w którym na przemian rozmieszczone są struktury MNN^+ i P^+NN^+ .

W obu przyrządach JBS i MPS wyspy P^+ są tak ukształtowane, aby **złącze P^+N chroniło złącze Schottky'ego przed przebiciem**. Dokonuje się to na drodze izolowania złącza MN od reszty struktury przez obszar ładunku przestrzennego, rozpościerający się wokół wstecznie spolaryzowanych złącz P^+N . Dzięki temu można uzyskać napięcia przebicia do 200 V.

Dodatkowo dioda MPS jest skonstruowana w taki sposób, aby **przy dużych natężeniach prądu struktura bipolarne P^+NN^+ przejmowała przewodzenie** od struktury unipolarnej MNN^+ . Dzięki temu dla danego natężenia prądu uzyskujemy niższe napięcie odkładane na diodzie, a więc mniejszą moc strat, niż dla zwykłej diody Schottky'ego (zob. rys. 7).

2.4. Zagadnienia aplikacyjne

2.4.a. Diody w układach elektroniki mocy

Diody mocy pracujące w układach mocy spełniają rolę łączników niesterowanych. Stosując kryterium aplikacyjne, diody mocy można podzielić na dwie grupy.

- 1) **Diody do zastosowań częstotliwości sieciowej** (50 Hz / 60 Hz), zwane też diodami prostowniczymi. Powinny się one charakteryzować jak najniższym napięciem w stanie przewodzenia, aby zminimalizować wydzielanie energii cieplnej w tym stanie, natomiast szybkość przełączania stanowi zagadnienie trzeciorzędne.

Diody takie najczęściej pracują jako główny składnik niesterowanych lub częściowo sterowanych prostowników i falowników o komutacji sieciowej (tj. takich, w których przełączanie diody jest wymuszane przez okresowe zmiany napięcia sieci zasilającej). Przyrządy te są wytwarzane dla bardzo szerokiego zakresu napięć i prądów znamionowych, sięgających nawet rzędu 10 kV i 10 kA.

- 2) **Diody do zastosowań dużej częstotliwości** (rzędu od 1 kHz do 1 MHz). W tym przypadku dąży się do uzyskania jak najmniejszych czasów załączania i wyłączania. Zadaniem tych diod jest najczęściej szybkie przejście prądu od innego przyrządu (tranzystora), który w danej chwili jest wyłączany, i odwrotnie – szybkie oddanie prądu do innego przyrządu, który w danej chwili jest załączany.

Diody tego rodzaju spotyka się w układach impulsowych takich jak przetwornice i falowniki impulsowe (ale nie tylko). W laboratorium ich działanie można zaobserwować w ćwiczeniu 6^A – jako tzw. diody zerowej zabezpieczającej łącznik przed przepięciami, a także w układzie przetwornicy w ćwiczeniu 3^B – jako elementu dwupołożeniowego łącznika półprzewodnikowego.

2.4.b. Parametry diod mocy

Każda dioda mocy ma określone dwa główne parametry znamionowe:

- **prąd graniczny**, przez który rozumie się **maksymalny średni prąd przewodzenia** $I_{F(av)m}$ – jest to maksymalna wartość średnia przewodzonego prądu, przy której nie następuje przekroczenie dopuszczalnej temperatury struktury półprzewodnikowej; wartość ta jest podawana dla konkretnej temperatury obudowy T_C , zwykle wyższej niż 25 °C;
- **klasa napięciowa**, przez którą rozumie się **maksymalne powtarzalne napięcie wsteczne** U_{RRM} – jest to maksymalna wartość, jaką może cyklicznie przyjmować napięcie wsteczne blokowane przez przyrząd; wartość ta jest ustalana na podstawie napięcia przebicia U_{br} z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa.

Powyższe parametry stanowią podstawowe dane, na podstawie których można dobrać odpowiednią diodę do konkretnego obwodu. Poza tym do ważniejszych parametrów podawanych przez producentów dla diod prostowniczych należą:

- **maksymalny dopuszczalny prąd skuteczny** $I_{F(rms)m}$ – oblicza się go z wartości $I_{F(av)m}$ zakładając, że przewodzony prąd ma kształt dodatniej półwłki sinusoidy;
- **niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia** I_{FSM} – to wartość, którą mogą osiągnąć pojedyncze, odosobnione impulsy prądu o określonym czasie trwania (zwykle równym połowie okresu sieci zasilającej, a więc 10 ms dla sieci europejskiej 50 Hz i 8,3 ms dla sieci amerykańskiej 60 Hz);

- **maksymalne niepowtarzalne napięcie wsteczne** U_{RSM} – to wartość, którą mogą osiągnąć pojedyncze, odosobnione piki napięcia wstecznego;
- **maksymalny powtarzalny prąd wsteczny** I_R lub I_{RRM} – producent gwarantuje, że przy napięciu wstecznym równym U_{RRM} prąd wsteczny nie przekroczy tej wartości;
- **napięcie progowe** $U_{F(TO)}$ – przy którym przedłużona prostoliniowo charakterystyka statyczna stanu przewodzenia, rozpatrywana w pewnym otoczeniu prądu znamionowego, przecięłaby się z osią napięcia;
- **rezystancja dynamiczna w stanie przewodzenia** r_F – nachylenie charakterystyki statycznej stanu przewodzenia w pewnym otoczeniu prądu znamionowego.

Uzupełnienie powyższych danych liczbowych stanowią charakterystyki pokazujące, jak zmienia się dopuszczalna moc wydzielana i dopuszczalna temperatura obudowy w funkcji wartości średniej prądu i jego kształtu.

Dla diod wysokiej częstotliwości istotne natomiast są:

- **czas odzyskiwania zdolności zaworowej** t_{tr} – czas przepływu prądu wstecznego przy wyłączaniu, określający czas wyłączania diody;
- **ładunek przejściowy przy wyłączaniu** Q_{tr} – ładunek nośników nadmiarowych, który musi zostać usunięty z diody podczas jej wyłączania.

3. Symulacje

3.1. Badanie diod PIN i SBD w stanie przewodzenia

Rozkład potencjału

Tę część ćwiczenia należy wykonać z użyciem skroszytu *pin_sbd_stan_przewodzenia.ods*, który należy skopiować na swoje konto.

Skroszyt zawiera jeden arkusz, w którym dla 2 diod mocy – PIN i SBD – wykreslane są 3 rozkłady wzdłuż osi x , tj. wzdłuż prostej anoda-katoda:

- $p(x)$ – rozkład gęstości dziur,
- $n(x)$ – rozkład gęstości elektronów,
- $V(x)$ – rozkład potencjału elektrycznego przy założeniu, że potencjał elektrody ujemnej, tj. katody, wynosi 0.

Dwa pierwsze rozkłady pokazują, jaka jest gęstość nośników danego typu (tj. ile się ich znajduje w jednostce objętości) w danej odległości x od anody.

Trzeci rozkład pokazuje, jaki jest **potencjał danego punktu względem punktu o potencjale 0**. (Przypomnijmy, że wartość potencjału jest zawsze względna i zależy od tego, którego punktu potencjał uznamy za zerowy.) Jak zaznaczono wyżej, w rozważanym przypadku za zerowy przyjmujemy najniższy potencjał występujący w diodzie, tj. potencjał katody.

Jednocześnie różnica potencjałów dwóch punktów równa jest napięciu między tymi punktami:

$$V(x_2) - V(x_1) = U_{21} \quad (3.1)$$

W związku z tym **różnica wartości $V(x)$ odczytanych na dwóch krańcach danego obszaru** (np. warstwy emitera, obszaru składowania ładunku, złącza itp.) mówi o tym, **jak duży jest spadek potencjału wywołany na tym obszarze diody przez przepływający prąd** (inaczej mówiąc – jak duża jest wartość napięcia odkładanego przez prąd na tym obszarze). W skrajnym przypadku różnica potencjału anody i potencjału katody, tj. różnica wartości na lewym i prawym krańcu krzywej rozkładu, równa jest całkowitemu napięciu na diodzie w stanie przewodzenia.

Dla diody PIN (patrz rys. 1b), uwzględniając zerowy potencjał katody $V_K = 0$,

$$V_A - V_K = V_A - 0 = V_A = V(-W_{EP}) - V(W_I + W_{EN}) = U_F \quad (3.2)$$

natomiast dla diody SBD (patrz rys. 6c)

$$V_A - V_K = V_A = V(-t_M) - V(W_I + W_{SN}) = U_F \quad (3.3)$$

Obserwacja krzywej rozkładu $V(x)$ pozwala tym samym stwierdzić:

- 1° jakie **całkowite napięcie** U_F występuje na diodzie o danych parametrach i przy danym natężeniu prądu – zgodnie z powyższym ($V_K = 0$) napięcie to jest równe potencjałowi anody V_A ;
- 2° jaki jest **wkład poszczególnych składników** (patrz par. 2.1.b i 2.3.b) w to całkowite napięcie.

Dodatkowo kształt krzywej rozkładu w danej warstwie świadczy o **charakterze przewodnictwa**. W warstwach o przewodnictwie unipolarnym (dryftowym) rezystywność $\rho(x)$ jest stała, więc na każdym elementarnym odcinku Δx odłoży się takie samo napięcie

$$\Delta U = \rho(x) \cdot \Delta x \cdot J \quad (3.4)$$

co oznacza liniowy przebieg krzywej rozkładu potencjału.

Natomiast w warstwach o przewodnictwie bipolarnym (dryft i dyfuzja) rezystywność $\rho(x)$ w każdym punkcie warstwy słabo domieszkowanej zależy od koncentracji nośników nadmiarowych w tym punkcie. Ponieważ koncentracja ta jest zmienna wzdłuż osi x , więc zgodnie z powyższym wzorem na różnych elementarnych odcinkach Δx obserwowane będziemy różne elementarne spadki potencjału. W tym przypadku charakter krzywej rozkładu potencjału będzie więc nieliniowy.

Korzystanie z arkusza kalkulacyjnego

Rozkłady wykreślane w arkuszu uzależnione są od następujących wielkości widocznych w oknie arkusza:

- 1) ogólnie obowiązujących stałych i parametrów fizycznych, którymi są:
 - e – ładunek elektronu,
 - μ_n i μ_p – ruchliwości elektronów i dziur,
 - n_i – koncentracja równowagowa nośników w półprzewodniku samoistnym,
 - k – stała Boltzmanna,
 - D_n, D_p, D_a – stałe dyfuzji elektronów, dziur i ambipolarna,
 - A^* – stała Richardsona;
- 2) parametrów technologicznych przyrządu, którymi są:
 - N_D – **koncentracja domieszek w warstwie słabo domieszkowanej,**
 - W_I – **szerokość warstwy słabo domieszkowanej,**
 - τ – **czas życia nośników mniejszościowych w warstwie słabo domieszkowanej (stosuje się wyłącznie do diody PIN),**
 - A – pole przekroju struktury prostopadłego do osi anoda-katoda,
 - N_{D+} i W_{N+} – koncentracja domieszek oraz szerokość warstwy N^+ (odpowiednio W_{EN} lub W_{SN}),
 - N_{A+} i W_{P+} – koncentracja domieszek w warstwie P^+ (stosują się tylko do diody PIN),
 - φ_B – potencjał bariery energetycznej złącza Schottky'ego (stosuje się tylko do diody SBD),

- N_{Al} i t_M – koncentracja elektronów (dla aluminium) i grubość elektrody metalowej (stosują się tylko do diody SBD);
- 3) warunków pracy przyrządu, które w przypadku stanu przewodzenia można ograniczyć do:
- **I_F – natężenia prądu, którego przepływ przez strukturę został wymuszony.**

Parametry przeznaczone do zmiany przez studenta zostały zaznaczone powyżej i w arkuszu pogrubioną czcionką. Pozostałych parametrów nie należy zmieniać. Nową wartość najlepiej zatwierdzać wciskając *Alt+Enter* – wówczas kursor nie będzie się przesuwać do następnej komórki.

Aby nie zaciemniać obrazu zjawisk i umożliwić jak najdokładniejszą obserwację kluczowej warstwy słabo domieszkowanej N^- , rozkłady wykreslane są przy założeniu skokowego charakteru złącza, tj. spadek potencjału na złączu występuje na nieskończenie krótkim odcinku Δx . Dodatkowo warstwa silnie domieszkowana N^+ może zostać ucięta z prawej strony tak, by nie powodowała niekorzystnej zmiany skali osi x (która uniemożliwiłaby dokładną analizę rozkładów w warstwie N^-).

Aby ułatwić analizę całkowitego napięcia na diodzie oraz udziału poszczególnych jego składników, wyliczane i wyświetlane są:

- całkowite napięcie na diodzie U_F ,
- składniki U_M , U_J , U_I i U_S dla diody SBD,
- składniki U_{EP} , U_{JP} , U_I , U_{JN} i U_{EN} dla diody PIN,
- rezystancja warstwy słabo domieszkowanej R_i .

Zapisywanie wyników graficznych

Wykonanie niektórych zadań należy udokumentować kopiując do szablonu notatek wykresy uzyskane dla wskazanych przypadków. W tym celu należy korzystać z przycisku (*Kopiuj*) *Wszystko*, który powoduje skopiowanie odpowiedniego obszaru arkusza do schowka. Aby przycisk *Kopiuj* zadziałał poprawnie, aktywnym oknem w chwili jego wciśnięcia musi być okno arkusza.

Do działania przycisków *Kopiuj* wymagane jest (jednorazowo) uprzednie wyłączenie w pakiecie LibreOffice blokady makr. Dokonuje się tego z menu *Narzędzia* ▶ *Opcje* ▶ *LibreOffice* ▶ *Bezpieczeństwo* ▶ *Bezpieczeństwo makr*; ustawić poziom bezpieczeństwa *Niski*. Po tej zmianie należy arkusz zamknąć i otworzyć ponownie.

Wykresy do dokumentu tekstowego należy wklejać w następujący sposób:

- z menu wybrać *Edycja* ▶ *Wklej specjalnie* lub wcisnąć *Ctrl+Shift+V*;
- wybrać opcję *Mapa bitowa* i zaakceptować;
- kliknąć prawym przyciskiem myszy na wklejonym rysunku;
- z menu kontekstowego wybrać *Zakotwiczenie* ▶ *Jako znak*;
- jeżeli zmiana zakotwiczenia spowodowała przesunięcie rysunku do niewłaściwego punktu, należy zaznaczyć rysunek przez pojedyncze kliknięcie na nim, a następnie wyciąć (*Ctrl+X*) i wkleić w poprawnej linijce (*Ctrl+V*).

Tworzenie tabel i wykresów

Oprócz formy graficznej, wskazane w szablonie notatek wyniki należy zapisać w formie liczbowej zamieszczając je w tabelach, na podstawie których należy następnie uzyskać i wkleić syntetyczne charakterystyki wielkości elektrycznych. Do realizacji tych zadań służy osobny arkusz *pin_sbd_stan_przewodzenia_wyniki.ods*.

Wyniki liczbowe z arkusza podstawowego (*pin_sbd_stan_przewodzenia*) do arkusza wyników (*pin_sbd_stan_przewodzenia_wyniki*) należy kopiować w następujący sposób:

- w arkuszu podstawowym wcisnąć (*Kopiuj*) *Liczby*;
- w arkuszu wyników zaznaczyć pierwszą komórkę kolejnego wiersza tablicy na górze arkusza;

- wybrać *Edycja* ▶ *Wklej specjalnie* lub wcisnąć *Ctrl+Shift+V*;
- zaznaczyć wyłącznie opcję *Liczby* (w szczególności niezaznaczona powinna być opcja *Formuły*) i zaakceptować.

Tabele i rysunki z arkusza wyników do szablonu notatek należy wklejać w następujący sposób:

- z menu wybrać *Edycja* ▶ *Wklej* lub wcisnąć *Ctrl+V*;
- kliknąć prawym przyciskiem myszy na wklejonej tabeli albo rysunku;
- z menu kontekstowego wybrać *Zakotwiczenie* ▶ *Jako znak*;
- jeżeli zmiana zakotwiczenia spowodowała przesunięcie tabeli albo rysunku do niewłaściwego punktu, należy zaznaczyć go przez pojedyncze kliknięcie na nim, a następnie wyciąć (*Ctrl+X*) i wkleić w poprawnej linii (*Ctrl+V*).

Wykonanie symulacji i analiza wyników

1. W odpowiednie pola arkusza wpisz numer zespołu i rok akademicki.

Wyniki bez wypełnionych powyższych pól zostaną uznane za uzyskane niesamodzielnie.

2. Ze strony internetowej uzyskaj i wpisz w odpowiednie pola początkowe wartości:

a) parametrów warstwy słabo domieszkowanej:

- koncentracji domieszek $N_{D,ini}$,
- szerokości $W_{I,ini(A)}$,
- czasu życia nośników mniejszościowych (dla diody PIN) τ_{ini} ;

b) natężenia prądu przewodzenia $I_{F,ini}$.

3. Uzyskaj wyniki i dokonaj ich analizy zgodnie z poleceniami zawartymi w szablonie notatek.

3.2. Badanie struktury PIN w stanie zaworowym

Korzystanie z arkusza kalkulacyjnego

Tę część ćwiczenia należy wykonać z użyciem skoroszytu *pin_stan_zaworowy.ods*, który należy skopiować na swoje konto.

Skoroszyt zawiera jeden arkusz, w którym wykreślany jest rozkład natężenia pola elektrycznego $E(x)$ wzdłuż diody PIN ($P^+N^-N^+$). Słowo *rozkład* oznacza wykres pokazujący, jakie wartości dana wielkość fizyczna przyjmuje w różnych punktach przestrzeni. W rozważanym, uproszczonym przypadku przestrzeń ta jest jednowymiarowa – ogranicza się do osi x tożsamej z prostą anoda-katoda zgodnie z rys. 1. Tak więc krzywa rozkładu $E(x)$ pokazuje, jak silne jest pole elektryczne w danym punkcie diody (definiowanym przez odległość x tego punktu od anody).

Rozkład natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanej strukturze półprzewodnikowej uzależniony jest od następujących wielkości widocznych w oknie arkusza:

- 1) ogólnie obowiązujących stałych i parametrów fizycznych, którymi są:
 - ϵ_{Si} – względna przenikalność elektryczna krzemu,
 - ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni,
 - e – ładunek elektronu;
- 2) parametrów technologicznych przyrządu, którymi są:
 - N_D – **koncentracja domieszek w warstwie słabo domieszkowanej**,
 - W_I – **szerokość warstwy słabo domieszkowanej (bazy)**,
 - N_{D+} – koncentracja domieszek w warstwie emitera N^+ ,
 - N_{A+} – koncentracja domieszek w warstwie emitera P^+ ;
- 3) warunków pracy przyrządu, które w przypadku stanu zaworowego można ograniczyć do:
 - U_R – **napięcia wstecznego przyłożonego do struktury**.

Parametry przeznaczone do zmiany przez studenta zostały zaznaczone powyżej i w arkuszu pogrubioną czcionką. Pozostałych parametrów nie należy zmieniać. Nową wartość najlepiej zatwierdzać klawiszem *Alt+Enter* – wówczas kursor nie będzie się przesuwać do następnej komórki.

Aby ułatwić stwierdzenie, czy w strukturze dochodzi do przebicia lawinowego lub skrośnego, na wykresie widoczne są dwie linie:

- E_{crit} – wskazująca poziom krytycznego natężenia pola elektrycznego,
- W_I – wskazująca koniec warstwy słabo domieszkowanej.

Oprócz tego, poniżej wartości U_R znajduje się pole, w którym wyświetlany jest komunikat:

- *przyłożone* – jeżeli napięcie o wpisanej wartości może wystąpić na przyrządzie,
- *niemożliwe* – jeżeli nie jest fizycznie możliwe wystąpienie na przyrządzie napięcia o wpisanej wartości, gdyż przy pewnym niższym napięciu przyrząd przeszedłby w stan przebicia lawinowego, co spowodowałoby przepływ prądu o bardzo dużej wartości, który doprowadziłby do przerwania obwodu wskutek spalenia któregoś z elementów.

Na podstawie wprowadzonych parametrów nie tylko wykreślany jest rozkład pola, ale również wyliczane są:

- krytyczne natężenie pola elektrycznego E_{crit} ,
- maksymalne (wzdłuż osi x) natężenie pola elektrycznego E_{max} ,
- szerokości obszaru ładunku przestrzennego w poszczególnych warstwach – kolejno $W_{sc(P+)}$, $W_{sc(N-)}$ i $W_{sc(N+)}$.

Zapisywanie i przetwarzanie wyników

Wykonanie niektórych zadań należy udokumentować kopiując do szablonu notatek wykresy uzyskane dla wskazanych przypadków. Oprócz formy graficznej, wskazane w szablonie notatek wyniki należy zapisać w formie liczbowej zamieszczając je w tabelach, na podstawie których należy następnie uzyskać i wkleić syntetyczne charakterystyki wielkości elektrycznych. Do realizacji tych zadań służy osobny arkusz *pin_stan_zaworowy_wyniki.ods*. Sposób postępowania w powyższych przypadkach jest analogiczny do opisanego w paragrafie 3.1 (nagłówki „Zapisywanie wyników graficznych” oraz „Tworzenie tabel i wykresów”).

Wykonanie symulacji i analiza wyników

1. W odpowiednie pola arkusza wpisz numer zespołu i rok akademicki.

Wyniki bez wypełnionych powyższych pól zostaną uznane za uzyskane niesamodzielnie.

2. Ze strony internetowej uzyskaj i wpisz w odpowiednie pola:
 - a) początkową koncentrację domieszek $N_{D,ini}$;
 - b) nową początkową szerokość warstwy słabo domieszkowanej $W_{I,ini(B)}$.
3. Uzyskaj wyniki i dokonaj ich analizy zgodnie z poleceniami zawartymi w szablonie notatek.

4. Wymagana wiedza

4.1. Przygotowanie do wykonywania ćwiczenia

Część pierwsza

- Koncentracja nośników i spadek potencjału na warstwie półprzewodnikowej w przypadku dryftu oraz w przypadku dryftu i dyfuzji. (instrukcja 0 – § 6.1, 6.5, 6.6)
- Budowa diody PIN i diody SBD (przekrój struktury). (§ 2.1, 2.3)

Część druga

- Budowa diody PIN (przekrój struktury). (§ 2.1)
- Rozkład pola elektrycznego przy złączu PN spolaryzowanym zaporowo. Definityjny warunek wystąpienia przebiecia lawinowego. Definityjny warunek wystąpienia przebiecia skrośnego. (instrukcja 0 – § 5.1, 5.2, 5.3)

4.2. Zakres kolokwium

Odpowiedź na większość poniższych zagadnień powinna być zawarta w notatkach i wymagała już skorzystania z odpowiedniej wiedzy. Tylko niektóre problemy mogą wymagać dokładniejszego przestudiowania instrukcji. W przypadku wyników liczbowych zamieszczonych w notatkach należy się ograniczyć do aspektu jakościowego (wartość w porównaniu do innych przypadków, charakter zależności), pomijając aspekt ilościowy (konkretne wartości bezwzględne).

1. Przewodnictwo unipolarne i bipolarne, dioda Schottky'ego (SBD) i dioda PIN w stanie przewodzenia.

Przekrój struktury SBD i PIN. Dryft oraz dyfuzja – mechanizmy fizyczne; gęstość prądu, konduktywność, rezystywność, spadek potencjału (umiejętność objaśnienia symboli i składników wzorów, bez wymagania znajomości tych wzorów na pamięć).

Rozkład koncentracji nośników i potencjału w warstwie słabo domieszkowanej (wykresy); zależność koncentracji (wartości rozważanej globalnie) od gęstości prądu, z wyjaśnieniem. Zależność konduktywności, rezystywności i spadku potencjału na warstwie słabo domieszkowanej od gęstości prądu i od parametrów

technologicznych tej warstwy (koncentracja domieszek, szerokość), wraz z wyjaśnieniem (związek z koncentracją nośników).

Modulacja konduktywności: w którym przyrządzie występuje, na czym polega, z czego wynika, jaki zysk przynosi. Wpływ czasu życia nośników mniejszościowych na koncentrację nośników i spadek potencjału przy przewodnictwie bipolarnym.

(notatki; dla diody SBD i przewodnictwa unipolarnego – § 2.2 oraz instrukcja 0 – § 6.1; dla diody PIN i przewodnictwa bipolarnego – § 2.1 oraz instrukcja 0 – § 6.2, 6.4, 6.5, 6.6)

2. Przyrządy wysokonapięciowe w stanie zaporowym.

Ładunek przestrzenny złącza asymetrycznego spolaryzowanego zaporowo: rozkład natężenia pola elektrycznego (wykres). Wpływ parametrów struktury półprzewodnikowej (przenikalności elektrycznej, koncentracji domieszek) – zastosowanie prawa Poissona.

Wpływ szerokości warstwy słabo domieszkowanej – struktury z i bez przebicia skośnego. Wpływ przyłożonego napięcia wstecznego – zastosowanie związku między napięciem a rozkładem pola elektrycznego.

Przebiecie lawinowe i przebicie skośne: mechanizm fizyczny, fizyczny warunek wystąpienia. Zależność wytrzymałości napięciowej od parametrów technologicznych warstwy słabo domieszkowanej (koncentracja domieszek, szerokość) dla struktur bez i z przebiciem skośnym, wraz z wyjaśnieniem.

(notatki; instrukcja 0 – § 5.1, 5.2, 5.3)

5. Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: *Poradnik inżyniera energoelektronika*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [2] Benda V., Gowar J., Grant D. A.: *Power Semiconductor Devices: Theory and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999.