

Diody półprzewodnikowe

5.1. Napięcie przewodzenia złącza p - n

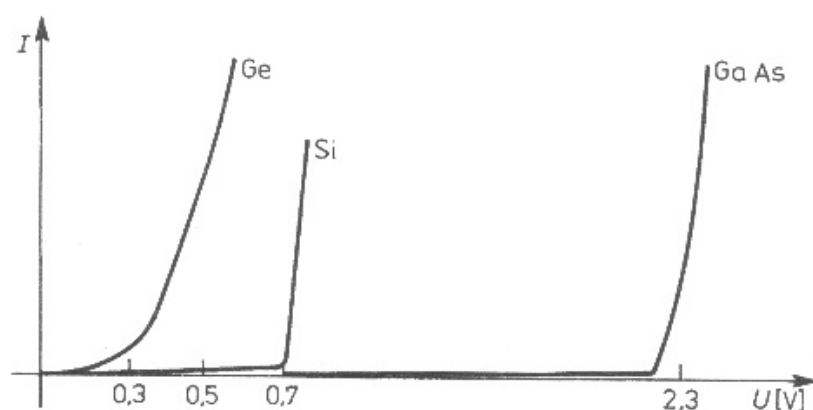
W poprzednim rozdziale wyprowadzone zostało równanie opisujące przepływ prądu I przez złącze p - n po spolaryzowaniu go napięciem U

$$I = I_G [\exp(eU/k_B T_u) - 1]. \quad (5.1)$$

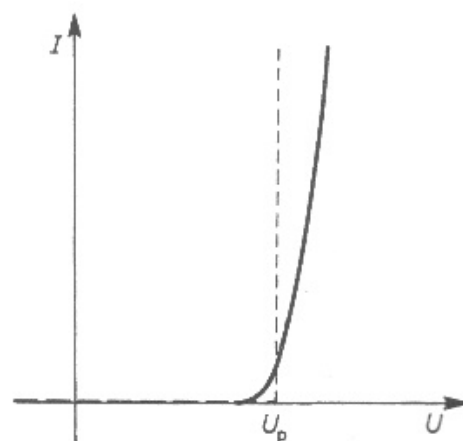
Poza procesami opisanymi za pomocą tego równania, w złączu zachodzi wiele innych zjawisk, których istoty omawiać tutaj nie będziemy. Przyjmijmy, że ich wpływ na charakterystykę złącza ujmuje parametr M . Należy także brać pod uwagę spadek napięcia na pasożytniczym oporze materiałów r , z których dioda została zbudowana. Równanie diody uwzględniające te wielkości przyjmie wówczas postać

$$U = \frac{Mk_B T_u}{e} \left(\ln \frac{I}{I_G} + 1 \right) + Ir; \quad (5.2)$$

M jest stałą związaną z danym typem półprzewodnika: ma inną wartość dla krzemu, inną dla germanu i inną dla arsenku galu. Kształty charakterystyk napięciowo-prądowych dla typowych złącz wykonanych z tych materiałów przedstawiono na rys. 5.1. Widać, że w każdym przypadku przepływ dużego prądu przez złącze



Rys. 5.1. Charakterystyki napięciowo-prądowe dla różnych złącz p - n



Rys. 5.2. Przybliżenie charakterystyki złącza za pomocą dwóch półprostych (oznaczonych liniami przerywanymi)

zachodzi praktycznie dopiero po przekroczeniu pewnego napięcia U_p zwanego *napięciem przewodzenia*. Wartość U_p związana jest z parametrem M . U_p ma wartość: dla germanu ok. 0,3 V, dla krzemu — 0,65 V, dla arsenku galu — blisko 2,3 V.

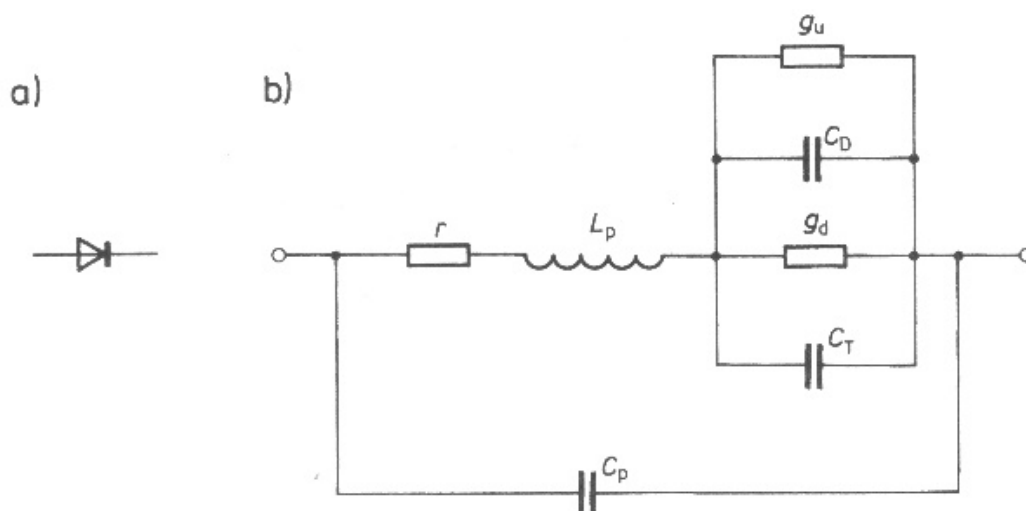
Jak to przedstawiono na rys. 5.2, charakterystykę złącza p - n można przybliżyć za pomocą dwu półprostych. Należy więc zawsze sobie zdawać sprawę z tego, że na złączu, przez które płynie prąd, istnieje spadek napięcia U_p i wydziela się w nim moc cieplna, którą można oszacować jako

$$P = U_p I. \quad (5.3)$$

W przypadku przewodzenia przez diodę prądów o dużych natężeniach należy uwzględnić również energię wydzielaną na pasożytniczym oporze r . Ciepło to powinno być skutecznie odprowadzane z elementu półprzewodnikowego, by nie nastąpiło zniszczenie złącza w wyniku przegrzania.

5.2. Schemat zastępczy diody

Przybliżony schemat zastępczy diody złożony z elementów biernych przedstawia rys. 5.3. Poza wielkościami pasożytniczymi, jak wspomniany już opór materiału r , indukcyjność L_p i pojemność C_p konstrukcji czy upływność złącza opisywana przez przewodność g_u , w schemacie tym istnieją jeszcze: nieliniowa przewodność g_d opisana w sposób uwikłany równaniem (5.2), pojemność dyfuzyjna C_D i pojemność C_T .



Rys. 5.3. Symbol graficzny (a) i schemat zastępczy diody (b)

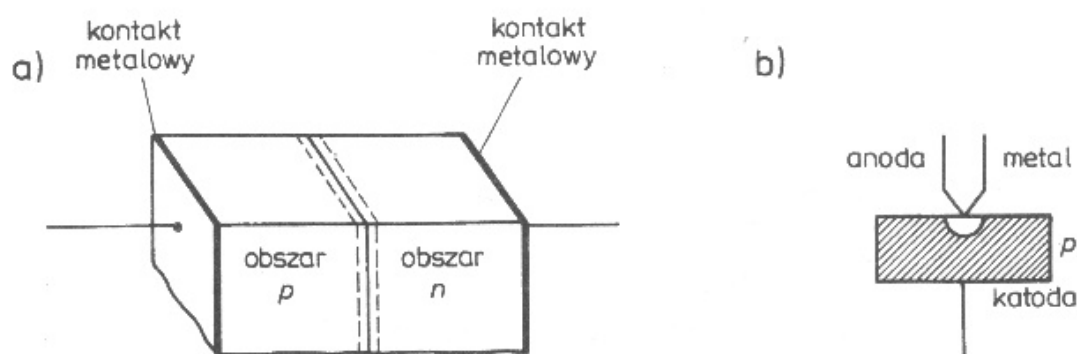
Pojemność C_T wynika z wytworzenia się w złączu ładunku przestrzennego: po stronie n niezobojętnionych jonów donorowych, po stronie p jonów akceptorowych.

Pojemność C_D , zwana dyfuzyjną, powstaje na skutek wstrzykiwania nośników mniejszościowych przez złącze w procesie przewodzenia. Ponieważ ich rekombinacja następuje dopiero po pewnym czasie (średnio $10^{-7} - 10^{-5}$ s), daje to efekt magazynowania ładunku w złączu.

5.3. Diody prostownicze

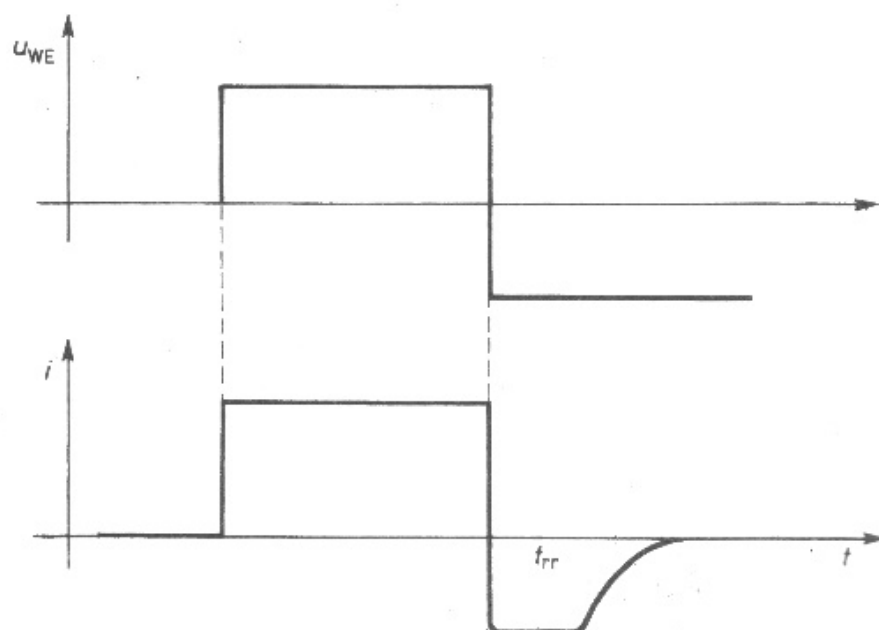
Jednym z najpowszechniejszych zastosowań złącza p - n jest użycie go do prostowania sygnałów zmiennych. Efekt prostowania zachodzi dzięki wykładniczej charakterystyce prądowo-napięciowej złącza (5.2), z której wynika, że rezystancja diody przy polaryzacji w kierunku przewodzenia jest znacznie mniejsza niż przy spolaryzowaniu w kierunku zaporowym. Można również zauważyć, że diody nie mogą prostować skutecznie napięć mniejszych od U_p .

Dążenie do osiągnięcia jak największych dopuszczalnych prądów przewodzenia zmusza konstruktorów do budowania diod o dużych powierzchniach złącza. Diody tego typu wykonywane są w postaci warstw półprzewodników (rys. 5.4a), a ich dopuszczalne prądy sięgają niekiedy tysięcy amperów.



Rys. 5.4. Idea konstrukcji diody warstwowej (a) i ostrzowej (b)

Należy jednak mieć na uwadze, że dla prądów wielkiej częstotliwości pojemności C_D i C_T bocznikujące złącze (rys. 5.3) mogą stanowić na tyle małą impedancję, że zjawisko prostowania nie wystąpi. W szczególności zmagazynowany w złączu ładunek nośników mniejszościowych przy zmianie polaryzacji może powracać przez barierę potencjału, i dawać w wyniku efekt „przeciągania sygnału” (rys. 5.5). Zjawisko to opisywane jest niekiedy parametrem t_{rr} zwanym *czasem przełączania* (także *czasem ustalania charakterystyki diody* lub *czasem odzyskiwania zdolności*



Rys. 5.5. Przebiegi przy przełączaniu diody

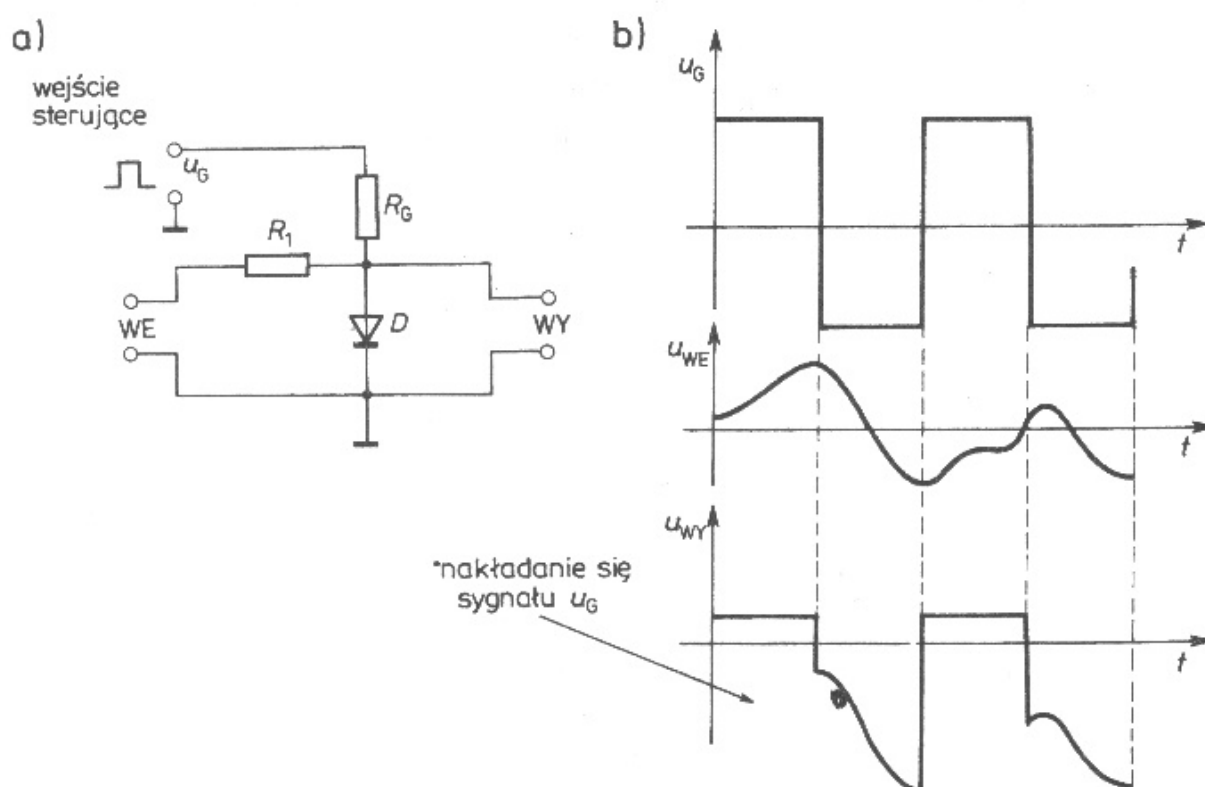
zaworowej). W czasie krótszym od t_{rr} , licząc od momentu zmiany polaryzacji złącza na zaporowy, dioda nie może być uważana za prostownik.

Pasożytnicze pojemności złącza można zmniejszyć ograniczając jego powierzchnię (jak np. w diodach ostrzowych — rys. 5.4b), stosując półprzewodniki charakteryzujące się krótkim czasem rekombinacji, jak również minimalizując obszar przyłączowy o niewielkiej koncentracji domieszek, co zapobiega gromadzeniu się nośników mniejszościowych. W ten sposób uzyskuje się diody przystosowane do pracy z sygnałami o częstotliwościach dochodzących do gigaherców. Ograniczenie powierzchni złącza związane jest jednak ze zmniejszeniem dopuszczalnego prądu diody. Dlatego diody o małych czasach ustalania charakterystyki nie mogą być stosowane przy wielkich natężeniach prądów i odwrotnie: prostowniki prądów o dużych natężeniach nie są szybkie.

Zastosowania diod w różnych rodzajach prostowników omówiono szerzej w rozdz. 11.

5.4. Dioda jako przełącznik

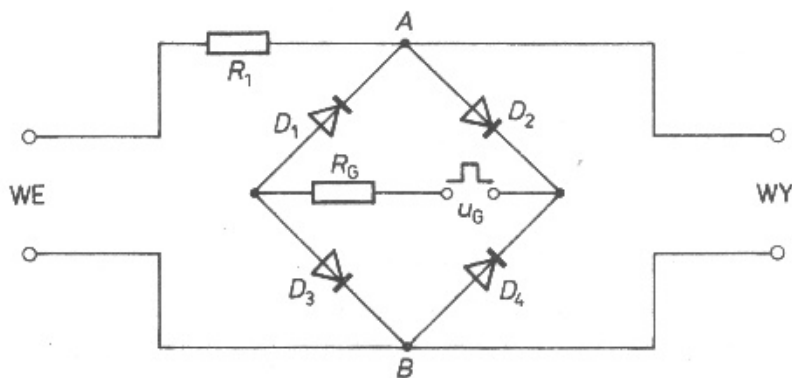
Rozważmy układ przedstawiony na rys. 5.6a. Do wejścia tego układu dostarczany jest sygnał analogowy, który w zależności od sytuacji na wejściu sterującym może dotrzeć do wyjścia lub zostać zablokowany. Jeżeli do wejścia sterującego jest przyłożone napięcie dodatnie tak, że dioda została spolaryzowana w kierunku przewodzenia, układ silnie tłumi sygnał przenoszony od wejścia do wyjścia. Spowodowane jest to tym, że przewodząca dioda stanowi niewielką rezystancję. W rezultacie napięcie sygnału wejściowego ulega znacznemu tłumieniu w dzielniku złożonym z opornika R_1 i diody D . Jednakże, gdy do wejścia sterującego dostarczone



Rys. 5.6. Dioda jako przełącznik: a) schemat podstawowy, b) diagramy sygnałów

zostanie napięcie polaryzujące diodę zaporowo, podział napięcia w tym dzielniku będzie pomijalny, gdyż nieprzewodząca dioda stanowi dużą rezystancję. Warunkiem poprawnej pracy przełącznika jest, by amplituda sygnału wejściowego była mniejsza niż napięcie przełączające diodę. Na rysunku 5.6b przedstawiono kształt przebiegów wyjściowych przy różnych napięciach sterujących.

Niewątpliwą zaletą tego typu przełącznika jest duża szybkość działania, gdyż czasy ustalania charakterystyki dla szybkich diod impulsowych wynoszą ułamki nanosekund. Jednak istotną wadą opisanego powyżej układu jest nakładanie się sygnału sterującego na sygnał przełączany. Przedstawiony na rys. 5.7 przełącznik wykorzystujący mostek



Rys. 5.7. Mostkowy przełącznik diodowy

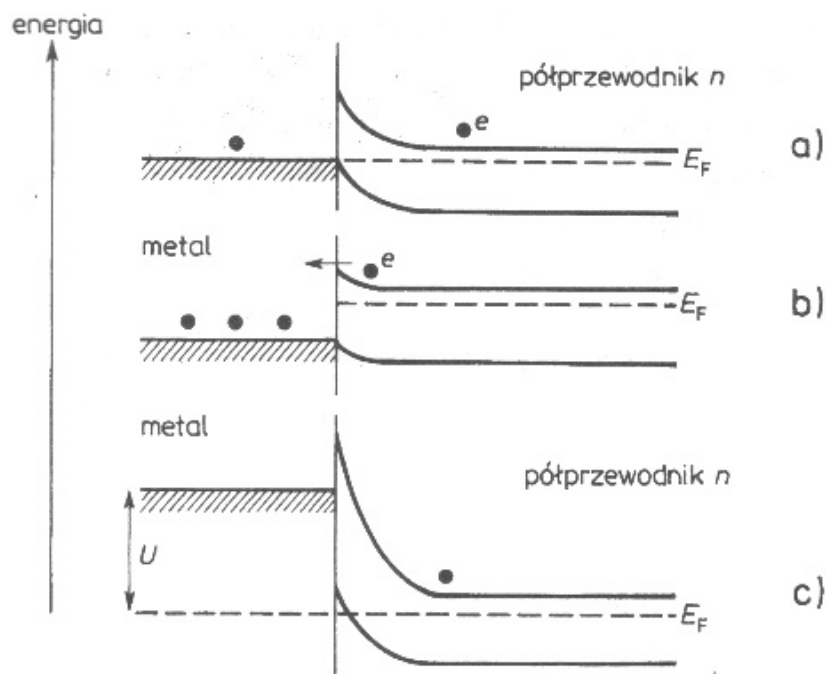
diodowy pozwala uniknąć tej niedogodności. Działanie diod w tym układzie jest podobne jak w przełączniku opisanym powyżej. Jeżeli do wejścia sterującego nie przyłożono napięcia doprowadzającego diody w mostku w stan przewodzenia, stanowią one duży opór dla sygnałów przenoszonych z wejścia do wyjścia układu. Gdy diody przewodzą, ich niewielka rezystancja zwiera wyjście przełącznika. Jednakże podobieństwo obu gałęzi mostka ($D_1 - D_2$ oraz $D_3 - D_4$) sprawia, że w punktach A i B — a tym samym na wyjściu — nie występuje różnica napięć spowodowana sygnałem sterującym.

5.5. Dioda Schottky'ego

Przyczyną ograniczonej szybkości przełączania diod krzemowych jest głównie pojemność dyfuzyjna. Jak już wspomnieliśmy, jest ona wywołana stosunkowo powolną rekombinacją nośników mniejszościowych wstrzykniętych do półprzewodników przez złącze w procesie przewodzenia. Są one magazynowane przez czas porównywalny z czasem rekombinacji w kryształach, a w wypadku szybkiej zmiany polaryzacji diody na zaporową dają efekt impulsu prądu wstecznego.

Zjawisko to nie zachodzi praktycznie w złączu typu metal—półprzewodnik, zwanym *złączem Schottky'ego*, dla którego rozkład pasm energii pokazano na rys. 5.8.

Działanie złącza metal—półprzewodnik jest następujące: w wyniku odkształcenia pasm energetycznych półprzewodnika na styku z metalem powstaje bariera potencjału, której nie mogą pokonać nośniki o energiach termicznych (rys. 5.8a). Spolaryzowanie złącza w kierunku przewodzenia umożliwia dyfuzję elektronów z półprzewodnika do metalu (rys. 5.8b). Należy jednak zwrócić uwagę, że elektrony te



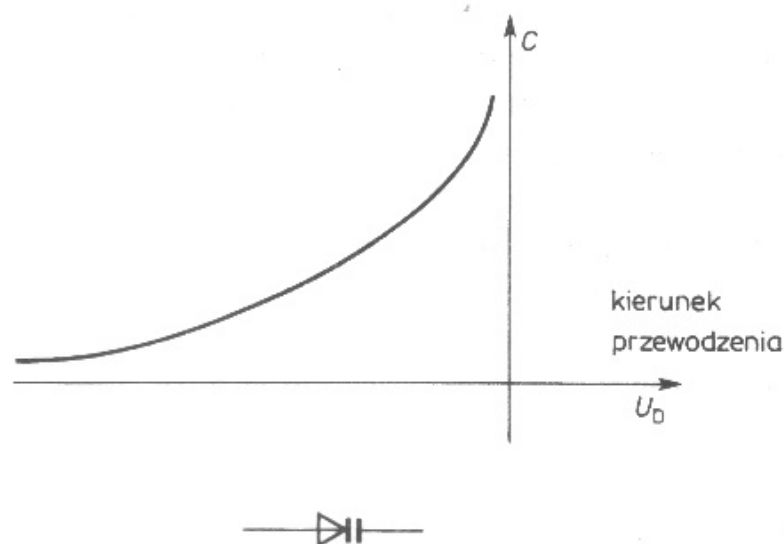
Rys. 5.8. Rozkład pasm potencjału w złączu Schottky'ego: a) stan bez polaryzacji, b) przy polaryzacji w kierunku przewodzenia oraz c) w kierunku zaporowym

charakteryzują się energią znacznie większą niż średnia energia elektronów w metalu. Mówimy o nich, że są *elektronami gorącymi*. Ponieważ jednak gęstość nośników swobodnych w metalu wynosi około 10^{23} cm^{-3} , wstrzyknięte z półprzewodnika elektrony gorące tracą swoją energię w wyniku zderzeń z zimnymi elektronami w czasie krótszym od ułamka pikosekundy. Praktycznie więc, nie istnieją w metalu zmagazynowane nośniki o dużej energii, które w przypadku szybkiej zmiany polaryzacji złącza zdolne byłyby pokonać wytworzoną wtedy barierę potencjału i powrócić przez złącze (rys. 5.8c). Dzięki temu nie istnieje problem pojemności dyfuzyjnej i czas odzyskiwania zdolności zaworowej przez diodę Schottky'ego wynosi zaledwie kilkadziesiąt pikosekund.

Diody Schottky'ego znajdują zastosowanie w najszybszych przełącznikach używanych między innymi w głowicach stroboskopowych.

5.6. Diody pojemnościowe

Wielkości pojemności C_D i C_T zależą od napięcia polaryzującego złącze $p-n$. Dzięki temu istnieje możliwość wykorzystania złącza $p-n$ jako pojemności o wartości sterowanej sygnałem elektrycznym (rys. 5.9). Diody specjalnie przystosowane do

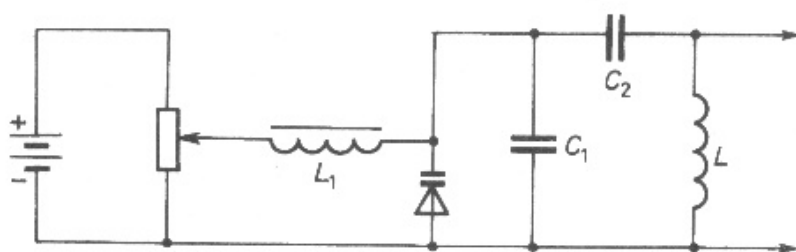


Rys. 5.9. Zależność pojemności warikapu od napięcia polaryzującego

tych celów nazywane są *diodami pojemnościowymi*. Są one obecnie powszechnie stosowane, na przykład jako zmienne reaktancje, do kontroli częstotliwości rezonansowej obwodów drgających, między innymi w odbiornikach radiowych, telewizorach itp.

Typowy schemat ich zastosowania pokazano na rys. 5.10. Dobierana za pomocą stałego napięcia regulowanego potencjometrem R pojemność diody dodaje się do

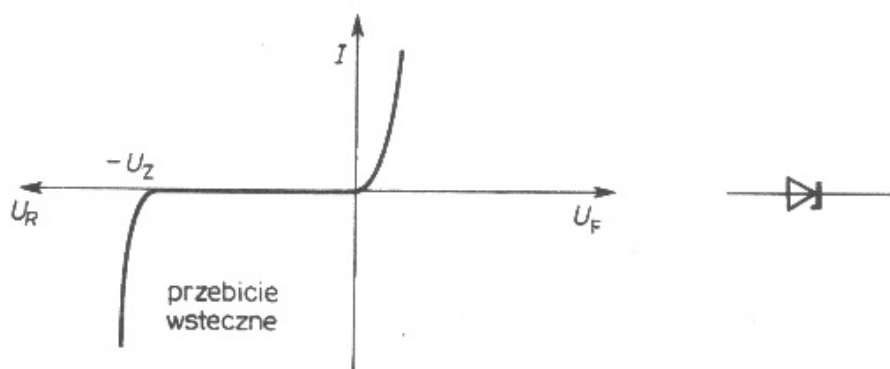
Rys. 5.10. Przestrzajanie układu rezonansowego za pomocą diody pojemnościowej



pojemności kondensatora C_1 w obwodzie rezonansowym LC . Dławik L_1 służy do zablokowania sygnału wielkiej częstotliwości i w ten sposób zapobiega zmniejszeniu dobroci układu drgającego.

5.7. Diody Zenera

Rysunek 5.11 przedstawia zależność między napięciem i natężeniem prądu w złączu w przypadku spolaryzowania go w kierunku zaporowym. Początkowo, zgodnie ze wzorem (5.1), wraz ze wzrostem napięcia wstecznego natężenie prądu zwiększa się nieznacznie. Jednak dla pewnej wartości, zwanej *napięciem Zenera* (U_Z), następuje przebicie złącza i dalej prąd płynący przez diodę rośnie bardzo gwałtownie.



Rys. 5.11. Zaporowe charakterystyki złącza $p-n$ w obszarze przebicia Zenera

Nazwa tego napięcia pochodzi od nazwiska uczonego, który badał zjawisko przebicia i stwierdził, że następuje ono w wyniku kilku efektów, często zachodzących jednocześnie. Są to:

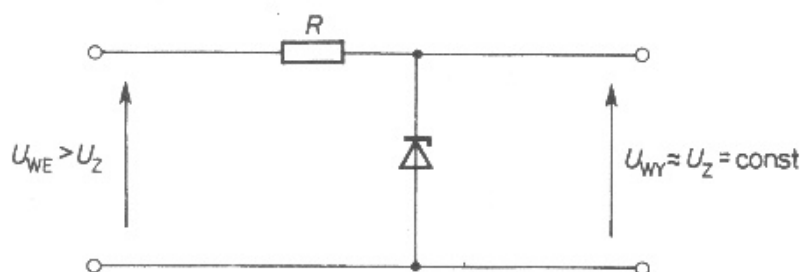
- powielanie nośników, które ulegają przyspieszaniu w silnym polu elektrycznym złącza. Przypomnijmy, że bariera potencjału złącza została powiększona o napięcie zaporowe. Dzięki temu przyspieszanie nośników w złączu jest na tyle duże, że między kolejnymi zderzeniami z siecią krystaliczną nośniki uzyskują energię wystarczającą, by w wyniku zderzenia nastąpiła ponowna generacja pary elektron – dziura. W rezultacie mamy do czynienia z tworzeniem lawiny nośników;

- wrywanie nośników z sieci siłami elektrostatycznymi — co zachodzi przy istnieniu bardzo silnych pól w złączu. Nośniki te są dalej powielane lawinowo;
- zwiększenie temperatury złącza, które zwiększa wydajność obu powyższych zjawisk.

W wyniku efektów lawinowych po przekroczeniu napięcia Zenera U_Z nachylenie charakterystyki na rys. 5.11 jest na tyle strome, że można przyjąć z dobrym przybliżeniem, że napięcie na złączu nie zależy od natężenia prądu w dość szerokim jego zakresie. Moc cieplna wydzielająca się w złączu, wyrażona wzorem $P = U_Z I$, przy braku kontroli natężenia prądu I może szybko doprowadzić do zniszczenia diody.

Wartość napięcia U_Z można ustalić w procesie produkcji diody przez odpowiedni dobór gradientu koncentracji domieszek w złączu. Jeżeli gradient ten jest duży, pole elektryczne w niespolaryzowanym złączu jest również duże. Wystarczy wtedy, że wysokość bariery potencjału zostanie zwiększona o niewielkie napięcie wsteczne U_Z , aby wartość pola elektrycznego wystarczyła do zapoczątkowania efektu lawinowego. Natomiast gdy gradient koncentracji domieszek ma niewielką wartość, pole elektryczne istniejące w niespolaryzowanym złączu jest małe i aby osiągnąć próg przebicia, należy dostarczyć do diody duże napięcie wsteczne. Liczni producenci elementów półprzewodnikowych wytwarzają rodziny diod Zenera (zwanych również *stabilitronami* lub *stabilistorami*) o różnych napięciach U_Z .

Ze względu na kształt charakterystyki wstecznej, diody Zenera wykorzystywane są jako najprostsze stabilizatory napięcia. Schemat takiego stabilizatora przedstawia rys. 5.12. Jest to dzielnik, na którego wyjściu napięcie jest zawsze zbliżone do U_Z , o ile tylko napięcie wejściowe układu jest większe od napięcia Zenera. Uzyskuje się tą drogą kilkuprocentową stabilizację napięcia*.



Rys. 5.12. Najprostszy stabilizator z diodą Zenera

Wykorzystanie powyższego układu jako źródła napięcia odniesienia z termostatowaną diodą Zenera pozwala na osiągnięcie stabilności dochodzących do ułamka promila.

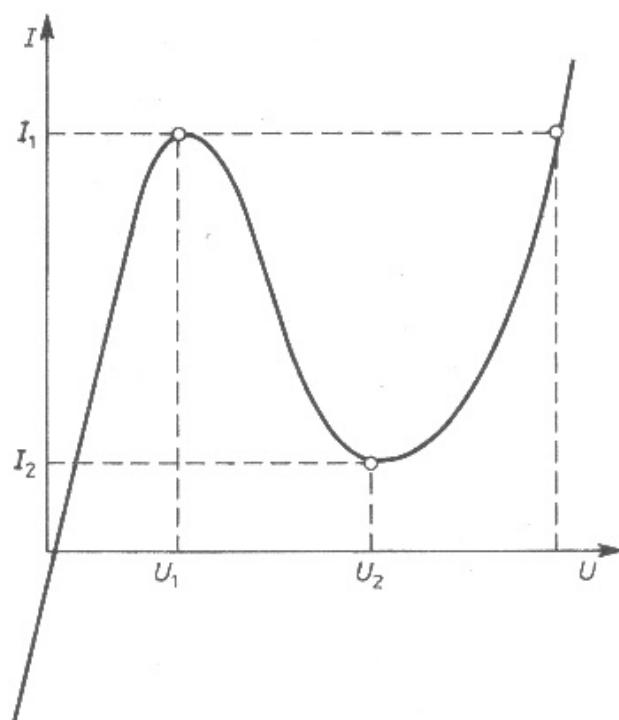
Zwróćmy uwagę, że dla dzielnika napięcia z rys. 5.12 spełnione są relacje: jeżeli $U_{WE} > U_Z$, to $U_{WY} = U_Z$; jeżeli $U_{WE} < U_Z$, to $U_{WY} = U_{WE}$.

Własność powyższa sprawia, że układ ten jest często stosowany jako ogranicznik napięcia.

* Współczynnik stabilizacji napięcia wyraża się wzorem: $\Delta U_{WY} / (U_{WY} \Delta U_{WE})$, w którym U_{WY} oznacza wartość napięcia wyjściowego, a iloraz $\Delta U_{WY} / \Delta U_{WE}$ — iloraz zmiany napięcia wyjściowego do zmiany napięcia wejściowego.

5.8. Diody tunelowe

Jeżeli w złączu p - n wytworzony zostanie bardzo wysoki gradient koncentracji domieszek (tym samym silne pole elektryczne), efekty lawinowe zachodzą w nim nawet bez zewnętrznego napięcia zaporowego. Poprawny opis zjawisk zachodzących w takim złączu jest możliwy tylko na gruncie mechaniki kwantowej z uwzględnieniem efektu przenikania nośników przez barierę potencjału, czyli zjawiska tunelowego. Stąd diody tego typu noszą nazwę *diody tunelowych*.

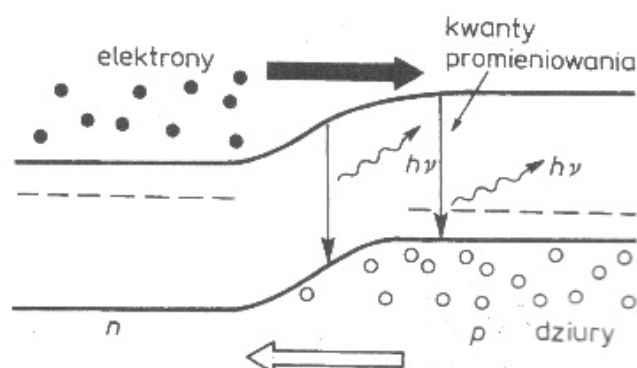


Rys. 5.13. Charakterystyka diody tunelowej

Charakterystyka (rys. 5.13) diody tunelowej zawiera między napięciami U_1 i U_2 odcinek o rezystancji dynamicznej ujemnej. O wykorzystaniu tego typu elementów do generacji sygnałów wielkiej częstotliwości piszemy w rozdziale 10.

5.9. Diody świecące (elektroluminescencyjne)

Wskutek wprowadzenia złącza p - n w stan przewodzenia następuje wstrzykiwanie nośników mniejszościowych do obszarów przyzłączowych, gdzie ulegają one rekombinacji. W jej wyniku może nastąpić generacja kwantu promieniowania o energii równej wielkości przerwy energetycznej (rys. 5.14). W arsenku galu z dodatkiem

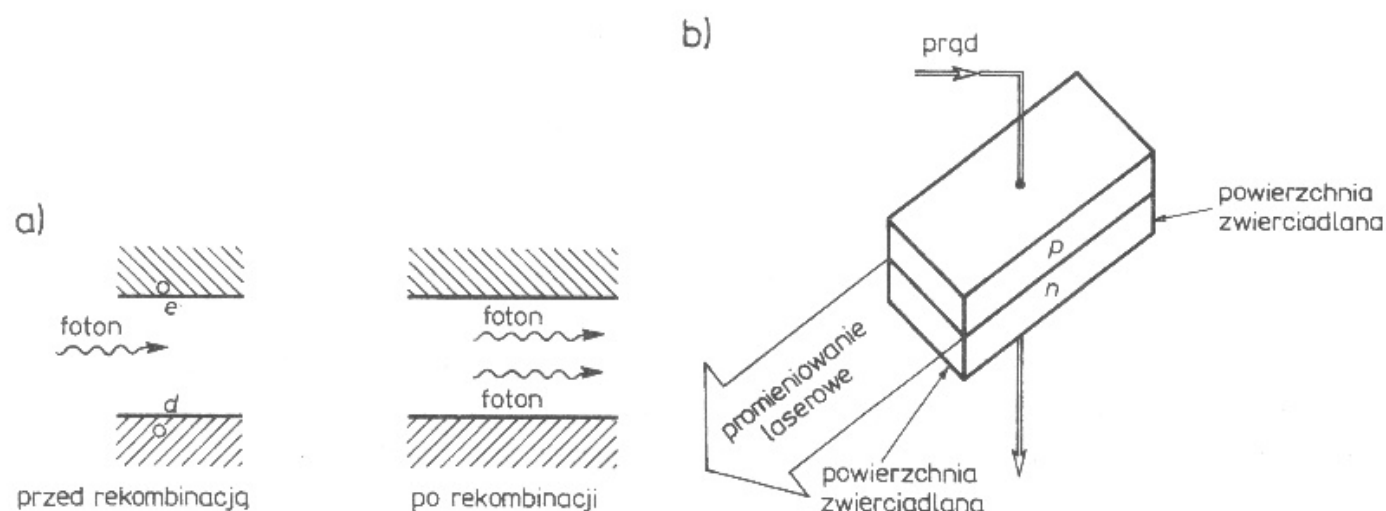


Rys. 5.14. Działanie diody świecącej

fosforu uzyskuje się przerwy energetyczne od 1,4 eV do 2,2 eV (w zależności od zawartości fosforu), co pozwala wytwarzać diody emitujące światło w zakresie od podczerwieni do zielonego obszaru widma. Diody świecące są szeroko stosowane jako wskaźniki, elementy wyświetlaczy cyfrowych lub alfanumerycznych czy też nadajniki w transoptorach.

5.10. Diody laserowe

Zgodnie z einsteinowską teorią oddziaływania światła z materią, promienista rekombinacja dziury z elektronem może zachodzić nie tylko na drodze spontanicznej, lecz także dzięki procesowi wymuszonemu. Czynnikiem wymuszającym jest promieniowanie o energii kwantów równej wielkości przerwy energetycznej (rys. 5.15a). W wyniku tej rekombinacji powstają nowe cząstki promieniowania (fotony) o takiej samej energii, kierunku rozchodzenia się i polaryzacji jak fotony promieniowania wymuszającego. Proces ten prowadzi do uporządkowania strumienia fotonów generowanych w złączu, co nazywamy *akcją laserową*.



Rys. 5.15. Wymuszony proces rekombinacji nośników (a) i idea konstrukcji lasera półprzewodnikowego (b)

Prawdopodobieństwo zajścia emisji wymuszonej w normalnych warunkach jest bardzo małe. Jednak w przypadku gdy przez złącze p-n przepływa prąd o bardzo dużym natężeniu, może dojść do sytuacji takiej, że wydajność rekombinacji nośników mniejszościowych będzie mniejsza od wydajności ich wstrzykiwania. W tych warunkach w obszarze przyłączowym w półprzewodniku p następuje nadmierne gromadzenie elektronów w paśmie przewodnictwa; analogicznie dziury nadmiernie gromadzą się w paśmie walencyjnym po stronie n. Stan ten nazywany jest *inwersją obsadzeń*. Dzięki dużemu natężeniu promieniowania, jakie powstaje wtedy w złączu (wzmocnionemu dzięki dwu równolegle ustawionym zwierciadłom, tworzącym rezonator optyczny — rys. 5.15b), rekombinacja następuje wówczas głównie w wyniku lawinowego procesu wymuszonego.

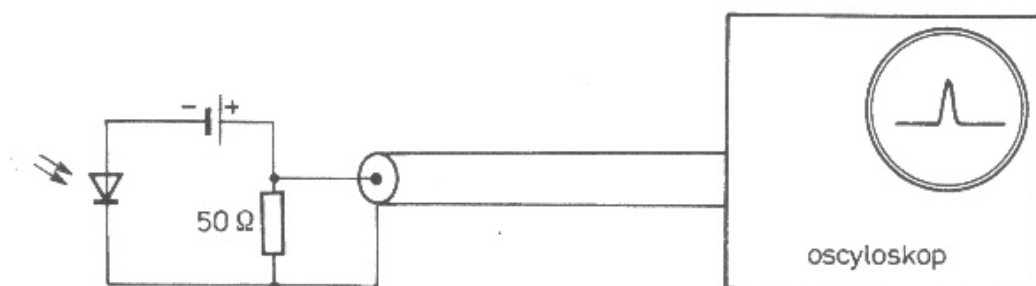
Zasadę działania laserów półprzewodnikowych przedstawiliśmy tutaj w dużym uproszczeniu. W rzeczywistości, ze względu na olbrzymie gęstości prądów, niezbęd-

ne do uzyskania w złączu akcji laserowej ($> 10^4 \text{ A/cm}^2$) oraz inne, nie wymienione tutaj zjawiska budowa diod laserowych jest znacznie bardziej złożona.

Długości fal świetlnych otrzymywane za pomocą dostępnych obecnie na rynku diod laserowych sięgają od podczerwieni do około 670 nm (światło czerwone); w stadium eksperymentów znajdują się lasery emitujące fale zielone i niebieskie. W stosunku do promieniowania wytwarzanego w diodach elektroluminescencyjnych, światło laserów półprzewodnikowych charakteryzuje się znacznie mniejszą rozbieżnością wiązki oraz monochromatycznością, co oznacza, że jego widmo jest zawarte w znacznie węższym przedziale długości fal. Długość fali promieniowania w tych laserach może być regulowana temperaturowo oraz przez zmianę natężenia prądu zasilania. Sprawność zamiany energii elektrycznej na energię świetlną w pewnych rodzajach tych laserów przekracza 50 %. Trwałość laserów diodowych sięga dziesiątków tysięcy godzin. Jeżeli do tego dodać, że są to jedne z najtańszych i najmniej złożonych układów laserowych, trudno się dziwić, że znajdują one coraz szersze zastosowanie zarówno w sprzęcie powszechnego użytku (odtwarzacze płyt kompaktowych), sprzęcie informatycznym (drukarki laserowe, czytniki dysków magnetoptycznych, czytniki kodów paskowych w kasach sklepowych), jak i w medycynie, telekomunikacji światłowodowej i w laboratoriach spektroskopowych.

5.11. Fotodiody

Prąd zaporowo spolaryzowanego złącza $p-n$ zależy od wydajności generacji nośników. Oświetlenie złącza promieniowaniem o energii kwantów wystarczającym do generacji par elektron – dziura powoduje zwiększenie tego prądu. Mechanizm ten wykorzystuje się w fotodiodach. Schemat wykorzystania fotodiody do pomiaru natężenia promieniowania przedstawiono na rys. 5.16. Częstotliwości pracy najszyb-



Rys. 5.16. Układ do pomiaru impulsów promieniowania z wykorzystaniem fotodiody

szych fotodiod sięgają wielu gigaherców, dzięki temu nadają się one do badania impulsów promieniowania o czasach trwania nawet rzędu dziesiątków pikosekund.

W fotodiodach spolaryzowanych napięciem bliskim napięcia przebicia następuje lawinowe powielanie nośników generowanych przez kwanty promieniowania. Dzięki temu czułości tych fotodiod (fotodiod lawinowych) zwiększają się kilka tysięcy razy, tak że mogą one czułością konkurować z fotopowielaczami, szczególnie w obszarze bliskiej podczerwieni. Są przy tym od nich znacznie szybsze. Wadą fotodiod lawinowych są duże szumy własne. Ostatnio jednak, wykorzystując fotodiody

lawinowe chłodzone ciekłym azotem, konstruowano liczniki pojedynczych fotonów. Szumy tych detektorów nie przekraczały pojedynczych „impulsów ciemnych” (patrz rozdz. 14) na sekundę.

Literatura

- P. E. Gray, C. L. Searle, *Podstawy elektroniki*, PWN, Warszawa 1976.
T. Masewicz, S. Wenda, *Materiałoznawstwo radiotechniczne*, WKiŁ, Warszawa 1973.
M. Rusek, R. Ćwirko, W. Marciniak, *Przewodnik po elektronice*, WNT, Warszawa 1986.
M. Rusek, J. Pasierbiński, *Elementy i układy elektroniczne*, WNT, Warszawa 1991.
A. Smoliński, *Optoelektronika światłowodowa*, WKiŁ, Warszawa 1985.
R. Śledziewski, *Elektronika dla fizyków*, PWN, Warszawa 1982.
B. Wilamowski, *Specjalne przyrządy półprzewodnikowe*, WKiŁ, Warszawa 1982.