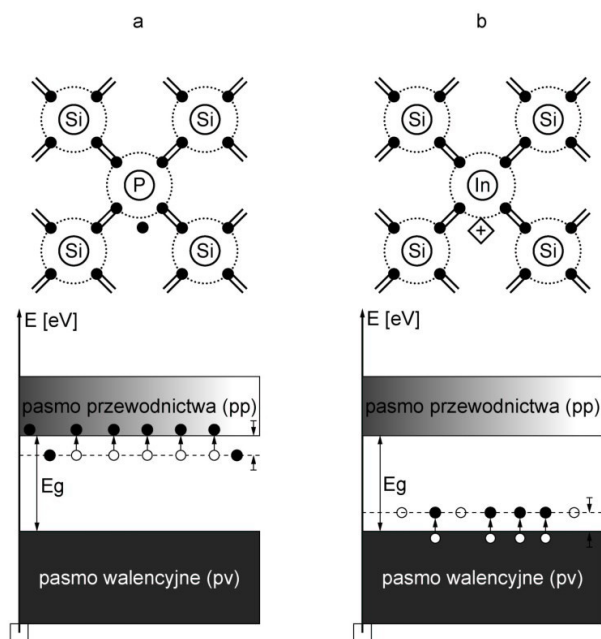


BADANIE WŁAŚCIWOŚCI PROSTOWNICZYCH DIODY PÓŁPRZEWODNIKOWEJ

WSTĘP

Biorąc pod uwagę zdolność do przewodnictwa prądu elektrycznego w szerokiej grupie ciał stałych możemy wyróżnić półprzewodniki o właściwościach pośrednich między dobrze przewodzącymi przewodnikami i izolatorami, charakteryzującymi się bardzo małymi koncentracjami swobodnych nośników ładunków elektrycznych. Półprzewodniki w temperaturze zera bezwzględnego mają całkowicie wypełnione pasmo walencyjne i puste pasmo przewodnictwa. Ze wzrostem temperatury ich przewodnictwo rośnie. Samoistne, bo naturalne właściwości półprzewodnikowe wykazują niektóre pierwiastki z wiązaniami kowalencyjnymi, np.: C, Si, Ge, As, Se, Sb, Te.

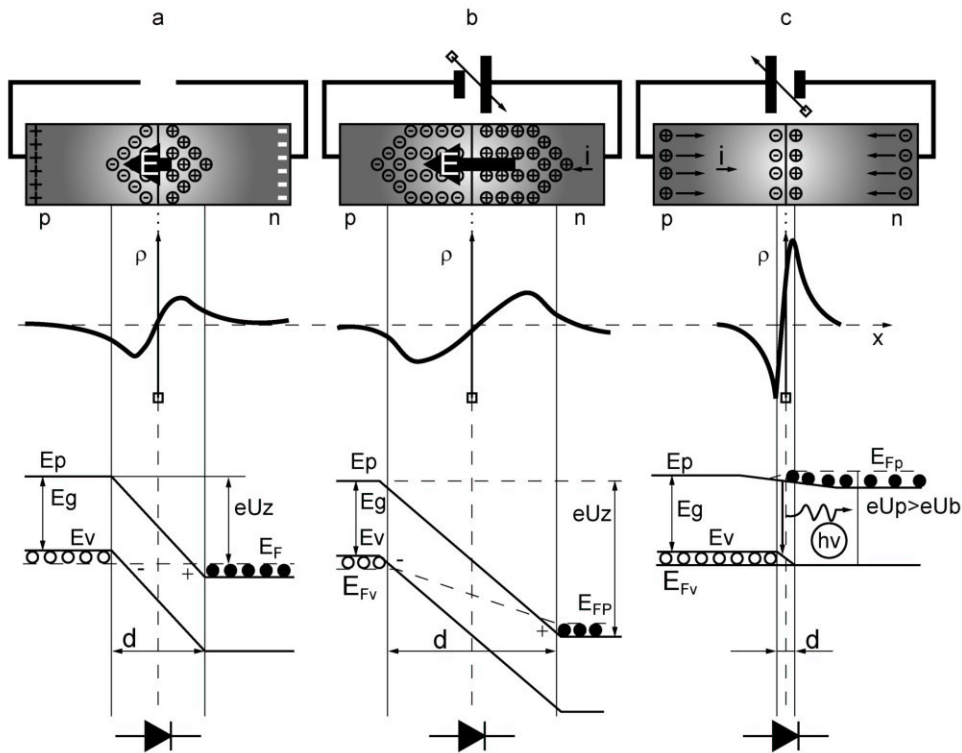
Wprowadzając celowo i w sposób kontrolowany domieszkowanie półprzewodników atomami innych pierwiastków można wpływać na wartość i typ przewodnictwa. Jeżeli kryształy np. grupy IV (Si, Ge) domieszkować będziemy pierwiastkami V grupy układu okresowego, np. As, Sb, P (donory), to otrzymamy półprzewodnik typu „n”. Poziomy energetyczne atomów domieszkowych zlokalizowane są w paśmie energii wzbronionej, tuż poniżej dna pasma przewodnictwa. Atomy domieszki posiadają w stosunku do atomów kryształu o jeden elektron walencyjny więcej i w temperaturach pokojowych łatwo stają się elektronami przewodnictwa (Rys. 1a).



Rys. 1. Model wzbudzeń nośników ładunku: a) w półprzewodniku typu n, b) w półprzewodniku typu p.

Jeżeli czysty krzem domieszkować będziemy pierwiastkami III grupy, np. Al, In, Ga, to otrzymamy półprzewodnik typu „p”. Wprowadzenie takiego rodzaju domieszki (akceptor), skutkuje otrzymaniem półprzewodnika typu „p”. W tym przypadku poziomy energetyczne atomów domieszkowych leżą w paśmie energii wzbronionych, tuż powyżej pasma walencyjnego. Poziomy energetyczne atomów domieszkowych nie są obsadzone przez elektrony tych atomów i mogą być zajmowane przez elektrony z pasma walencyjnego kryształu. Procesowi przejścia elektronu z pasma walencyjnego na poziom domieszki towarzyszy wytworzenie dziury w paśmie walencyjnym (Rys. 1b). W półprzewodniku typu „n” przewodnictwo elektryczne zasadniczo uwarunkowane jest ruchliwością elektronów, zaś w półprzewodniku typu „p” – ruchliwością dziur.

Obecnie szerokie stosowanie półprzewodników zawdzięczamy wyjątkowym zjawiskom zachodzącym w strefie kontaktu półprzewodników o różnym typie przewodnictwa. Granicę zetknięcia dwóch półprzewodników, z których jeden odznacza się przewodnictwem **n** (elektronowym) a drugi przewodnictwem **p** (dziurowym), nosi nazwę przejścia elektronowo - dziurowego lub złącza **p-n**. W kontrolowanych procesach domieszkowania można wytworzyć w jednym kryształce półprzewodnika złącze **p-n** (homozłącze). W takim kryształce po jednej stronie złącza w części **n** występuje duża koncentracja elektronów, a w części **p** duża koncentracja dziur [1].



Rys. 2. Zjawiska fizyczne zachodzące w obszarze złącza p-n w przypadku **a**) braku zewnętrznego pola E (kontaktowa bariera potencjałów U_b), po spolaryzowaniu złącza: **b**) w kierunku zaporowym napięciem U_z lub **c**) w kierunku przewodzenia napięciem U_p ($U_p > U_b$). **Górna część rysunku:** rozkład przestrzenny ładunku elektrycznego wokół złącza p-n, **część środkowa:** rozkład koncentracji elektronów i dziur, **część dolna:** zmiany w modelu pasmowym.

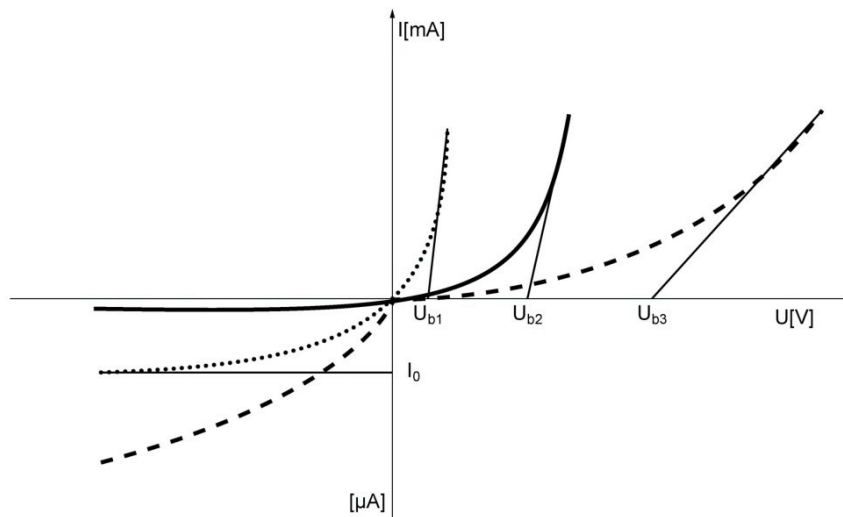
W stanie równowagi termicznej elektrony przewodnictwa pochodzące od donorów znajdują się głównie w obszarze typu **n**, gdzie zubożniają dodatni ładunek przestrzenny zjonizowanych donorów, podczas gdy dziury pochodzące z akceptorów znajdują się głównie w obszarze typu **p**. Jeżeli na obszar złącza nie działa zewnętrzne pole elektryczne, to niemożliwym jest by doszło do całkowitego oddzielenia się elektronów od dziur. W takich warunkach dziury będą dyfundować do części **n** pozostawiając w części **p** ujemnie naładowane jony akceptorowe, podczas gdy elektrony będą dyfundować do części **p**, pozostawiając w części **n** dodatnio naładowane jony donorowe. Zjawisko to określane jako pierwotna dyfuzja powoduje wytworzenie podwójnej elektrostatycznej warstwy (inwersyjnej) na złączu. Z obecnością tej warstwy związane jest wewnętrzne pole elektryczne o natężeniu E skierowane od części **n** do **p**, przeciwdziałające możliwości dalszej dyfuzji nośników przez złącze (Rys. 2a). Następuje efekt ukonstytuowania się poziomów Fermiego w obszarze stykowym **p-n** (inwersji).

Rozpatrzmy co się stanie, jeżeli do złącza przyłożymy zewnętrzne pole elektryczne E_z , którego kierunek jest zgodny z kierunkiem pola wewnętrznego E . Sposób spolaryzowania złącza przedstawia wówczas Rys. 2b. Obecność zewnętrznego pola skutkuje wzmocnieniem efektu wywołanego działaniem pola wewnętrznego i wzrostem grubości podwójnej warstwy elektrostatycznej d . Wymuszony polem E_z prąd elektryczny płynący przez złącze nazywamy prądem zaporowym, a sposób polaryzacji złącza - kierunkiem zaporowym. Zwiększenie grubości warstwy elektrostatycznej powoduje wzrost oporu elektrycznego tego obszaru, co skutkuje słabym przewodnictwem złącza **p-n** możliwością przepływu prądu zaporowego I_z o bardzo małym natężeniu.

Po zmianie polaryzacji napięcia przyłożonego do zewnętrznych warstw złącza **p-n**, jak przedstawiono na Rys. 2c, pole E_z jest skierowane przeciwnie do pola wewnętrznego związanego z efektem inwersji. W obszarze warstwy zaporowej następuje wzrost koncentracji swobodnych elektronów i dziur, co przyczynia się do zmniejszenia jej grubości d oraz zbliżenia się poziomów Fermiego. Polaryzację złącza p-n związaną takim kierunkiem zewnętrznego pola elektrycznego nazywamy kierunkiem przewodzenia. Prąd I_p przepływający przez spolaryzowane w kierunku przewodzenia złącze **p-n** może osiągać duże natężenie i nazywamy jest prądem przewodzenia. Należy zaznaczyć, że warunkiem

przepływu przez złącze **p-n** prądu przewodzenia I_p o znaczącej wartości natężenia jest przewyciężenie przez zewnętrzne pole elektryczne działania pola wewnętrznego wywołanego inwersją. Dla każdego typu złącza **p-n** podaje się umownie określaną wartość napięcia U_b (Rys. 3.) zwanego progowym napięciem przewodzenia, po którego przekroczeniu opór złącza ulega gwałtownemu zmniejszeniu.

W środkowej części Rysunku 2 pokazano zmiany zachodzące w rozkładzie gęstości ładunku ρ w zależności od odległości x od złącza, natomiast część dolna tego rysunku przedstawia powodowane sposobem polaryzacji złącza zmiany w modelu pasm energetycznych, w którym: E_p to dno pasma przewodnictwa, E_v – wierzchołek pasma walencyjnego, E_F , E_{Fv} , E_{Fp} – poziomy energii Fermiego w obszarze inwersji, E_g – przedział energii wzbronionej, $h\nu$ – energia wydzielająca się w procesie rekombinacji.



Rys. 3. Charakterystyka prądowo napięciowa złącza **p-n** na bazie Ge, Si As.

Sposób poprowadzenia stycznych do części charakterystyk dla kierunku przewodzenia pokazuje metodę oszacowania wartości progowej napięcia przewodzenia: U_{b1} , U_{b2} lub U_{b3} .

Styk dwóch półprzewodników o różnym typie przewodnictwa cechuje silna zależność natężenia prądu mogącego płynąć przez złącze p-n w zależności od sposobu przyłożenia napięcia do jego końców (Rys. 3.). Dla tych samych wartości napięć przyłożonych do złącza stosunek I_p/I_z może być rzędu dziesiątek tysięcy i więcej. Dla napięcia przemiennego elementy ze złączami p-n, nazywane diodami, umożliwiają lub blokują swobodny przepływ prądu elektrycznego w zależności od kierunku różnicy potencjałów panującej na ich złączach. Z uwagi na ich wyjątkową właściwość nazywamy je diodami prostowniczymi dla prądu przemiennego.

Niezależnie od polaryzacji napięcia U natężenie prądu dyfuzyjnego I_d płynącego przez złącze **p-n** opisuje wzór Shockley'a:

$$I_d = I_{0,d} \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

w którym: U – napięcie polaryzacji złącza, przyjmujące znak „+” dla kierunku przewodzenia lub znak „-” dla kierunku zaporowego,

T – temperatura złącza,

k – stała Boltzmanna,

e – ładunek elementarny,

$I_{0,d} = \frac{eS}{D_n \frac{n_p}{L_n} + D_p \frac{p_n}{L_p}}$ nosi nazwę prądu nasycenia nośników mniejszościowych, przy czym:

S – powierzchnia przekroju poprzecznego złącza,

D_n i D_p – stałe dyfuzji elektronów i dziur,

L_n i L_p – średnie drogi dyfuzji elektronów i dziur,

n_p i p_n – koncentracje nośników.

Rzeczywista dioda oprócz złącza p-n posiada dwa dospawane do powierzchni półprzewodnikowych warstw p i n elektryczne doprowadzenia w postaci drutów z przewodnika. Całość zamknięta jest w hermetycznej obudowie (metalowej lub plastikowej), zapewniającej ochronę przed niepożądanym działaniem czynników zewnętrznych lub zapewnienia lepszego odprowadzania nadmiarowego ciepła wydzielanego podczas pracy diody w strefie złącza. Do głównych czynników traktowanych jako pasożytnicze i odpowiedzialnych za efekty zniekształcające „idealną” charakterystykę złącza p-n, można zaliczyć: rezystancję szeregową R_s i równoległą R_r diody, zjawiska generacji i rekombinacji nośników prądu w obszarze złącza, zjawiska powierzchniowe, zjawiska przebicia.

W diodzie, oprócz głównego prądu dyfuzyjnego I_d płynącego przez złącze, należy uwzględnić obecny w obszarze p-n prąd rekombinacji I_r związany z rekombinacją nośników ładunku oraz spadek napięcia na rezystancji szeregowej R_s , który odpowiada za obniżenie na złączu różnicę potencjałów. Natężenie prądu rekombinacji I_r jest proporcjonalne do koncentracji obecnych w obszarze złącza centrów rekombinacji i jest opisane następującym wzorem:

$$I_r = I_{0,r} \cdot \left(e^{\frac{eU}{2 \cdot kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

w którym $I_{0,r}$ oznacza wartość natężenia nasyczonego prądu rekombinacji.

Wobec powyższego natężenie I wypadkowego prądu płynącego przez spolaryzowane w kierunku przewodzenia złącze p-n wyraża wzór:

$$I = I_d + I_r = I_{0,d} \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) + I_{0,r} \cdot \left(e^{\frac{eU}{2 \cdot kT}} - 1 \right) \quad (3)$$

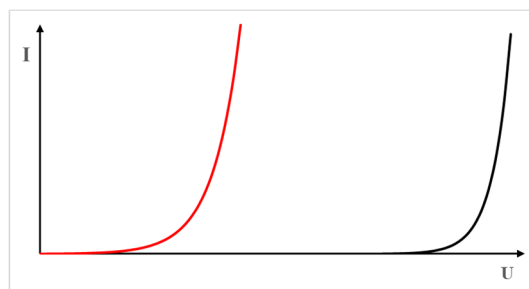
który można przedstawić w postaci ogólniejszej:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{eU}{M \cdot kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

a dla napięć U większych od 100 – 400 mV (wartość zależna od półprzewodników tworzących złącze) wzór (4) można uprościć do:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{eU}{M \cdot kT}} \quad (5)$$

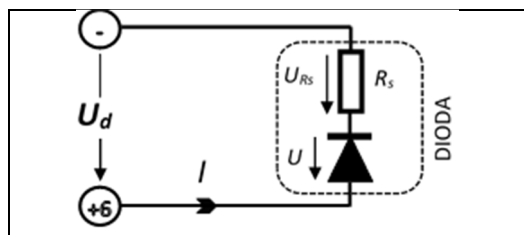
We wzorach (4) i (5) wielkość I_s traktowana jest jako zastępczy prąd nasycenia, natomiast M charakteryzuje mechanizm odpowiedzialny za przepływ prądu przez złącze p-n i nosi nazwę współczynnika doskonałości złącza, przyjmującego wartość z przedziału od 1 (tylko prąd dyfuzyjny) do 2 (tylko prąd rekombinacji).



Rys. 4. Charakterystyki diody w kierunku przewodzenia, gdy $M = 1$ (krzywa czarna) oraz $M = 1.5$ (krzywa czerwona). Krzywe przesunięto na osi U w celu lepszego uwidocznienia różnic w charakterystykach.

Na Rys. 4. przedstawiono wpływ współczynnika niedoskonałości M na kształt charakterystyki diody w kierunku przewodzenia. Ze wzrostem M (ponad wartość równą 1, oczekiwaną przez równanie Shockley'a dla złącza idealnego, krzywa czarna) osiągnięcie wysokoprądowej części charakterystyki zachodzi w szerszym zakresie zmian napięcia złącza.

Kolejnym ważnym czynnikiem mającym wpływ na charakterystykę diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia jest opór czynny charakteryzowany wypadkową rezystancją szeregową R_s . Zwykle średnia wartość tego oporu jest rzędu omów i głównie wynika z niedoskonałości wykonania przewodzących doprowadzeń do półprzewodnikowych warstw złącza.

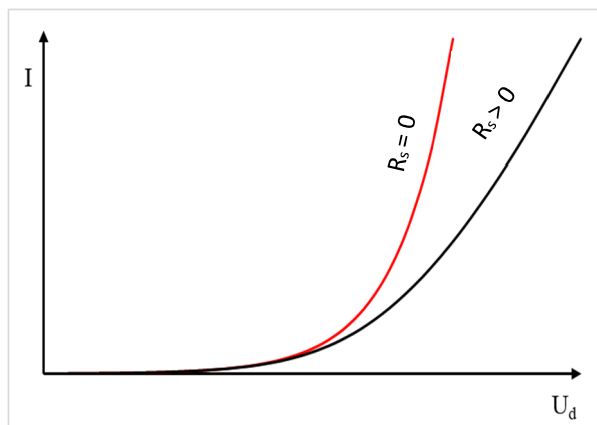


Rys. 5. Uwzględniający rezystancję szeregową R_s model diody spolaryzowanej napięciem U_d w kierunku przewodzenia. Na rysunku zaznaczono spadki napięć: U – na złączu p-n oraz U_R – na rezystancji szeregowej R_s .

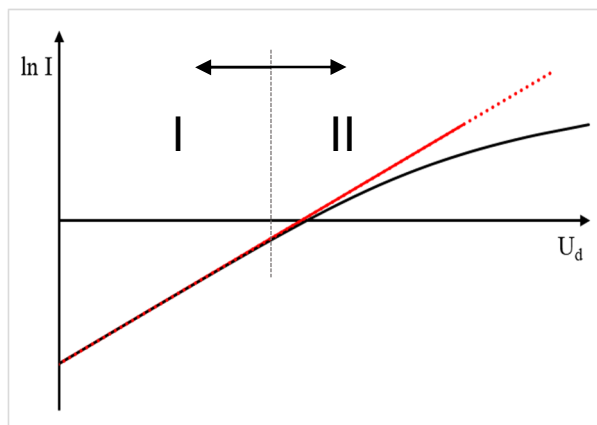
Spolaryzowanie diody napięciem U_d w kierunku przewodzenia (Rys. 5.) wymusza natężenie I prądu jednocześnie przepływającego i przez złącze, i rezystancję szeregową R_s . Spadek napięcia na rezystancji R_s sprawia, że tylko część zewnętrznego napięcia U_d przyłożonego do diody panuje na złączu. Wartość napięcia U na złączu p-n wynosi:

$$U = U_d - I \cdot R_s \quad (6)$$

Jak wynika z (6) wzrost natężenia prądu I w sposób liniowy powoduje zmniejszanie napięcia na złączu. Efekt ten osłabia stromość charakterystyki prądowo-napięciowej diody, co pokazano na Rys. 6. Jednocześnie poważnym staje się efekt samonagrzewania się diody przewodzącej prąd, co związane jest z wydzielaniem się ciepła Joule'a (Q_{strat}) na rezystancji szeregowej. Przypadająca na jednostkę czasu (dt) wielkość strat energii na ciepło dQ wynosi: $P_{strat} = \frac{dQ_{strat}}{dt} = I^2 R_s$. W wielu przypadkach niezbędnym jest zamocowanie diody do radiatora skutecznie rozpraszającego to ciepło do otoczenia, co pozwala utrzymać temperaturę złącza zbliżoną do otoczenia.



Rys. 6. Charakterystyka diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia: dla $R_s = 0$ – krzywa czerwona oraz dla $R_s > 0$ – krzywa czarna.



Rys. 7. Charakterystyka z Rys. 3 przedstawiona w półlogarytmicznym układzie współrzędnych.

Wprowadzenie ze znakiem ujemnym składnika $I \cdot R_s$ do opisanej zależności (5) charakterystyki dla kierunku przewodzenia pozwala uwzględnić efekt obecnej w diodzie rezystancji szeregowej R_s o niezerowej wartości:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{e \cdot (U_d - I \cdot R_s)}{M \cdot k \cdot T}} \quad (9)$$

Wyrażenie (9) tworzy funkcję uwikłaną, a jej przebieg w półlogarytmicznym układzie współrzędnych ($\ln(I), U$) przedstawiono na Rys. 7. W charakterystyce przewodzenia diody z rezystancją szeregową R_s można wyróżnić dwa różniące się przebiegiem obszary oznaczone symbolami „I” i „II” (Rys. 7.), rozdzielone umowną pionową przerywaną linią.

Obszar II charakteryzuje spowolnienie (w odniesieniu do diody „idealnej”) szybkości wzrostu natężenia prądu przewodzenia diody ze wzrostem napięcia na jej końcach. Efekt ten staje się szczególnie wyraźny gdy diodę cechuje duża rezystancja szeregowa, a jego wielkość proporcjonalnie zwiększa się ze wzrostem natężenia prądu przewodzenia (dla $U_d > U_b$), co wiąże się ze wzrostem spadku napięcia na R_s .

Obszar I odpowiada małym natężeniom prądu płynącego przez diodę (o wartościach z zakresu mikroamperowego i mniejszych), w którym wpływ rezystancji szeregowej na charakterystykę diody jest praktycznie niezauważalny. W półlogarytmicznym układzie współrzędnych ta część charakterystyki posiada przebieg bardzo zbliżony do prostoliniowego, który można opisać równaniem prostej stycznej:

$$\ln(I) = a \cdot U_d + b \quad (10)$$

w którym: a – jest nachyleniem stycznej,
b – odcięta.

Z drugiej strony efekt przekrywania się w obszarze I charakterystyk diody rzeczywistej i diody „idealnej” pozwala z dobrym przybliżeniem uprościć zależność (9):

$$I = I_s \cdot e^{\frac{e \cdot (U_d - I \cdot R_s)}{M \cdot k \cdot T}} \approx I_s \cdot e^{\frac{e \cdot U_d}{M \cdot k \cdot T}} \quad (11)$$

Po obustronnym zlogarytmowaniu zewnętrznych stron powyższej zależności, otrzymujemy:

$$\ln(I) = \frac{e}{M \cdot k \cdot T} \cdot U_d + \ln(I_s) \quad (12)$$

Wprowadźmy do zależności (12) stałą Θ (13), którą szacujemy przyjmując tabelaryczne wartości: stałej Boltzmann $k = 1,380 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$, ładunku elementarnego $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ oraz szacowaną wartość średniej temperatury diody podczas jej pracy $T = 303 \pm 10 [K]$. Wobec powyższego średnia wartość stałej Θ wraz z jej całkowitą niepewnością $u(\Theta)$ wynosi:

$$\Theta = \frac{k \cdot T}{e} = 26,1 \pm 1,8 [\cdot 10^{-3} V] \quad (13)$$

Stałą Θ nazywa się potencjałem termicznym złącza.

Uwzględniając stałą Θ zależność (12) możemy zapisać w postaci:

$$\ln(I) = \frac{1}{M \cdot \Theta} \cdot U_d + \ln(I_s) \quad (14)$$

Zależności (10) i (14) opisują ten sam fragment charakterystyki diody w kierunku przewodzenia. Odpowiednie składniki tych zależności są równe, stąd otrzymuje się związki (14):

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{M \cdot \Theta} \\ b &= \ln(I_s) \end{aligned} \quad (15)$$

Dla badanej diody w oparciu o doświadczalnie wyznaczone wartości nachylenia (a) oraz odciętej (b) prostoliniowej części charakterystyki prądowo-napięciowej można wyznaczyć, odpowiednio:

a) współczynnik doskonałości złącza M:

$$M = \frac{1}{a \cdot \Theta} \quad (16)$$

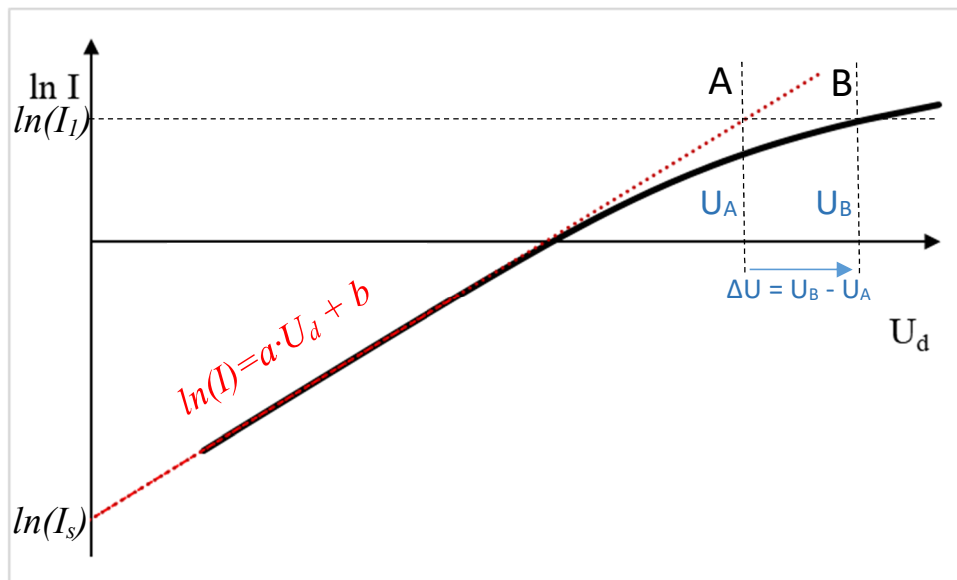
b) zastępczy prąd nasycenia, I_s :

$$I_s = e^b \quad (17)$$

Typowe diody prostownicze charakteryzują się wartością $M \approx 1$, ponieważ producenci tak je konstruują, by w obszarze złącza p-n przeważał prąd dyfuzyjny. Gdy jednak w prądzie przewodzenia udział składowej prądu rekombinacji przestanie być pomijalnie mały, wówczas za przepływ nośników ładunku elektrycznego przez złącze p-n odpowiedzialny jest mechanizm dyfuzyjno-rekombinacyjny, co znajduje odzwierciedlenie w większej wartości M ($1 < M < 2$). Wartości zastępczych prądów nasycenia I_s diod przyjmują bardzo małe wartości, $I_s \ll 1 \mu A$.

WYZNACZENIE WARTOŚCI REZYSTANCJI SZEREGOWEJ R_s DIODY RZECZYWISTEJ.

Na Rys. 8. pokazano konstrukcję wyznaczenia pomocniczych wartości dla oszacowania wartości rezystancji szeregowej R_s diody. W części charakterystyki wykazującej wyraźny nieliniowy charakter należy poprowadzić odcinek AB równoległe do osi U_d dla arbitralnie wybranej wartości I_1 . Długość tego odcinka w skali napięć równa jest spadkowi napięcia ΔU na rezystancji R_s .



Rys. 8. Charakterystyka diody w kierunku przewodzenia (krzywa czarna). Na wykresie pokazano konstrukcję dla wyznaczenia parametrów aby oszacować wartość R_s .
Opis oznaczeń w tekście.

Zgodnie z prawem Ohma dla odcinka obwodu wartość R_s wynosi:

$$R_s = \frac{\Delta U}{I_1} = \frac{U_B - U_A}{I_1} \quad (18)$$

Wartości U_B i $\ln(I_1)$ współrzędnych punktu B leżącego na krzywej wykresu zawarte są w tabeli wyników. Natomiast wartość U_A odnoszącą się do punktu A należy obliczyć. W tym celu korzystamy z faktu, że punkt A leży na stycznej, której równanie (10) zostało wyznaczone. Równanie (10) dla współrzędnych punktu A ma postać:

$$\ln(I_1) = a \cdot U_A + b \quad (19)$$

Łącząc równania (18) i (19) otrzymujemy wzór pozwalający oszacować wartość R_s :

$$R_s = \frac{U_B - \frac{\ln(I_1) - b}{a}}{I_1} \quad (20)$$

DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE (LED)

Do szczególnych złącz p-n należą konstrukcje dla których priorytetem jest uzyskanie dużej wydajności procesów połączonych z emisją kwantów światła (fotonów) podczas przejść promienistych w wyniku rekombinacji ładunków elektrycznych. Diody z takimi złączami nazywamy LED (*Light Emitting Diode*). Energia emitowanego fotonu światła o długości λ jest w przybliżeniu równa szerokości przerwy energetycznej E_g półprzewodnika:

$$E_G = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (21)$$

gdzie: h – to stała Plancka,
 c – prędkość światła w próżni.

Procesy promienistych rekombinacji elektronów z dziurami wymagają przyłożenia do złącza p-n napięcia o minimalnej wartości U_{min} dla wytworzenia zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu wymaganym dla przejść elektronów do pasma przewodnictwa. Minimalna ilość energii E pola elektrycznego, którą dodatkowo musi otrzymać elektron by przeskoczyć z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, musi być co najmniej równa szerokości energetycznej E_g :

$$E_G \leq e \cdot U_{min} \quad (22)$$

Między długością emitowanego przez LED światła o długości λ i napięciem U_{min} od którego dioda zaczyna świecić, występują praktyczne zależności wynikające z wzorów (21) i (22):

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_{min}} \quad (23)$$

$$E_G = e \cdot U_{min} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Zależności (23) stanowią podstawę metod szacowania wartości λ lub odpowiadającej długości fali wartości E_g dla diod LED w oparciu o łatwy do wykonania pomiar napięcia U_{min} . Podane zależności zawierają szereg uproszczeń, co jest wynikiem pominięcia w powyższych rozważaniach wielu efektów i złożonych zjawisk fizycznych zachodzących w złączu p-n diody LED. Dlatego otrzymane na ich podstawie wartości należy traktować jako szacunkowe.

Dla potrzeb produkcji diod LED emitujących światło z zakresu widzialnego, dla fioletu $E_g \approx 3.2$ eV i dla czerwieni $E_g \approx 1.6$ eV, stosuje się półprzewodniki o wartościach szerokości przerwy energetycznej z podanego przedziału. W poniższej Tabeli zebrano wartości przerwy energetycznej w temperaturze pokojowej (300 K) dla niektórych półprzewodników [6].

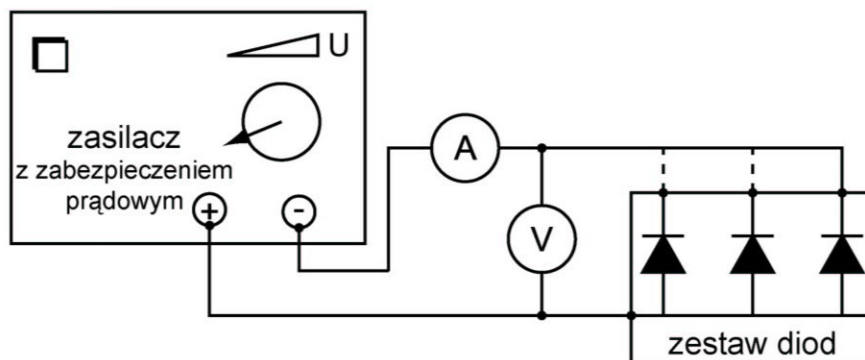
E _g [eV] w temperaturze T=300 [K]											
antymonek indu	arsenek galu	german	antymonek galu	krzem	fosforek indu	arsenel galu	tellurek kadmu	selenek kadmu	fosforek galu	tlenek cynku	siarczek cynku
InSb	InAs	Ge	GaSb	Si	InP	GaAs	CdTe	CdSe	GaP	ZnO	ZnS
0,17	0,36	0,66	0,68	1,11	1,27	1,43	1,44	1,74	2,25	3,2	3,6

W diodach z krzemowymi (Si) lub germanowymi (Ge) złączami p-n wydajność procesów promienistej rekombinacji elektronów i dziur jest znikomo niska. Oddawana przez elektron nadwyżka energii w postaci kwantu światła podczas przeskoku z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego jest całkowicie przejmowana przez strukturę półprzewodnika, co skutkuje wzrostem lokalnej temperatury obszaru w którym proces nastąpił. Należy zaznaczyć, że naturalną polaryzacją diod elektroluminescencyjnych jest kierunek przewodzenia. Dla wielu konstrukcji LED już niewielkie napięcia kierunku zaporowego mogą przyczynić się do trwałego uszkodzenia ich struktur.

UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Układ do badań (Rys. 9.) wyposażony jest w zasilacz napięcia stałego z zabezpieczeniem prądowym, dwa uniwersalne mierniki cyfrowe, jeden zestaw z diodami prostowniczymi, i jeden zestaw z diodami LED. Zasilacz umożliwia płynną regulację napięcia wyjściowego w zakresie od 0 V do 30 V. Przed przystąpieniem do pomiarów należy w jednym z mierników włączyć funkcję pomiaru napięcia a w drugim funkcję pomiaru natężenia prądu.

Wybór zestawu z rodzajem diod do badań uzgodnić z Prowadzącym zajęcia.



Rys. 9. Schemat układu do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych diod w kierunku zaporowym.

WYKONANIE POMIARÓW

W.1. POMIAR CHARAKTERYSTYKI PRĄDOWO-NAPIĘCIOWEJ

1. Połączyć układ pomiarowy według schematu odpowiedniego dla kierunku przewodzenia.
2. Po sprawdzeniu obwodu przez Prowadzącego zajęcia podłączyć do sieci zasilającej zasilacz i mierniki.
3. Wyznaczyć wartość maksymalną prądów przewodzenia diod aby prawidłowo dobrać zakres amperomierza. W tym celu pokrętkę zasilacza wymusić przez krótką chwilę maksymalną, dopuszczalną warunkami bezpieczeństwa dla danej diody, wartość napięcia. Czynność tę powtórzyć dla pozostałych diod. Uwzględniając maksymalną wartość zmierzonych natężeń prądów włączyć taki zakres amperomierza, by obejmował tę wartość oraz był możliwie najniższy.
4. Zmieniając napięcie zasilania diody odczytywać i notować w Tabeli Pomiarów wartości wskazań mierników. Pomiarów wykonać dla co najmniej 10 – 15 różnych wartości napięć.

Uwaga: dla każdej z badanych diod pomiary należy wykonywać w możliwie jak najkrótszym czasie aby nie doprowadzać do nadmiernego podgrzania diody.

Nie oczekiwać stabilnych w czasie wskazań mierników, ponieważ uniemożliwiają to wywołane przepływem prądu przewodzenia ciągłe zmiany temperatury diody.

5. Obniżyć napięcie zasilające i dokonać przełączenie układu na kolejną diodę.
6. Wykonać pomiary dla wszystkich diod.

UWAGA: w przypadku diod LED powyższy punkt kończy pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych.

7. Na zasilaczu zamienić miejscami przewody zasilające dokonując zmiany polaryzacji na kierunek zaporowy. (Mierniki zaczną wskazywać wartości ze znakami przeciwnym, do wyświetlanych w poprzedniej konfiguracji układu.)
8. Powtórzyć z Pkt. 3. procedurę wyboru zakresu amperomierza.
9. Stopniowo zwiększać napięcie na złączach diody i dla co najmniej 10 – 15 różnych wartości odczytać i zanotować w Tabeli Pomiarów wartości wskazań mierników.
10. Powtórzyć pomiary dla pozostałych diod.
11. Dla użytych mierników zapisać w osobnej tabeli informacje dotyczące ich typu oraz niepewności wzorcowania i niepewności eksperymentatora.

W.2. POMIAR U_{min} DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE (LED)

- Wykonać polecenia z pkt. 1-6 i 11 części W.1.
- Obniżyć do minimum napięcie zasilania diody. Następnie powoli zwiększać napięcie diody i obserwować jej powierzchnię emitującą światło. W chwili zauważenia początku świecenia diody, odczytać i zanotować w Tabeli Pomiarów wartość napięcia U_{min} wskazywanego przez woltomierz.
- Przełączyć układ na kolejną diodę. W sposób podany w pkt. 2 wykonać pomiar napięcia U_{min} .
- Wykonać co najmniej po 3 pomiary dla każdej z diod LED.

W przypadku diod LED emitujących światło o długości fal spoza zakresu widzialnego, powierzchnię świecącej diody obserwować posiadając się kamerą telefonu komórkowego.

W.3. CZĘŚĆ FAKULTATYWNA

O konieczności wykonania tej części decyduje Prowadzący, podając rodzaj i liczbę diod do zbadania.

- W wykonać czynności z pkt. 1-3 instrukcji W.1.
- Dla jednej ze wskazanych przez Prowadzącego diody pomiary dla kierunku przewodzenia wykonać:
 - w zakresie $0 < I < 1$ [mA] dla co najmniej 5 – 7 różnych wartości U ,
 - w zakresie $1 \leq I \leq 11$ [mA], zwiększając I co ok. 2 mA,
 - dla $I > 11$ mA, zwiększając U co ok. 2 V, do wartości maksymalnej.
- Dla pozostałych diod pomiary ich charakterystyk w kierunku przewodzenia oraz pomiary dla kierunku zaporowego (wszystkich diod) wykonać wg pkt. 4-9, 11 instrukcji W.1.

TABELA POMIARÓW (Dla każdej z badanych diod wykonać osobną tabelę.)

DIODA 1			
KIERUNEK PRZEWODZENIA		KIERUNEK ZAPOROWY	
U	I	U	I
[V]	[A]	[V]	[A]
...
...
...

Dla bardzo małych wartości stosować mnożniki, zapobiegając nadmiarowi w pisaniu nieznaczących zer.

TABELA POMIARÓW U_{min} DIOD ELEKTROLUMINESCENCYJNYCH

DIODA LED				
IR	R	G	B	UV
U_{min}^{IR}	U_{min}^R	U_{min}^G	U_{min}^B	U_{min}^{UV}
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]

PRZYRZĄDY POMIAROWE, NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

Miernik	Woltomierz, U	Amperomierz, I
Producent / Typ:		
Zakres pomiarowy*	$z = [\quad]$	$z = [\quad]$
Niepewność wzorcowania * **	$C_1 = \dots [\dots]$ $C_2 = \dots [\dots]$	$C_1 = \dots [\dots]$ $C_2 = \dots [\dots]$
Niepewność eksperymentatora *	$\Delta_e(U) = [\quad]$	$\Delta_e(I) = [\quad]$

- * w przypadku korzystania z różnych zakresów miernika, stosowną informację zapisać w osobnych wierszach, odpowiednio dla każdego z zakresów,
- ** w miejsca C_1 i C_2 wstawić wartości odczytanie z karty katalogowej producenta miernika.

OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

O.1. CHARAKTERYSTYKA PRĄDOWO-NAPIĘCIOWA

1. Oszacować rozszerzone ($k = 2$) wartości niepewności zmierzonych bezpośrednio wielkości: $U(U)$ i $U(I)$.

$$U(U) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(U))^2 + (\Delta_e(U))^2}{3}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{(C_1 \cdot U + C_2)^2 + (\Delta_e(U))^2} \quad (24)$$

$$U(I) = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{(C_1 \cdot I + C_2)^2 + (\Delta_e(I))^2} \quad (25)$$

Gdy podczas wykonywania serii pomiarów zmieniano zakres miernika i zmieniła się wartość C_1 lub C_2 , należy wykonać osobny dla każdego przypadku przykład obliczeń.

2. Wykonać obliczenia dla pozostałych danych z pomiarów uzupełniając otrzymanymi wynikami Tabelę Wyników.

TABELA WYNIKÓW

l.p.	U	$U(U)$	I	$U(I)$
	[V]	[V]	[A]	[A]
1				
2	
...	
...	
...				

3. Dla kierunku przewodzenia w jednym układzie współrzędnych wykonać wykres zależności natężenia prądu od napięcia przykładanego do badanych diod.
4. Na wykresie z użyciem pomocniczych przerywanych linii wykonać konstrukcję pozwalającą oszacować wartości progu napięcia przewodzenia U_b każdej z badanych diod. Użyć jednej z możliwych metod szacowania tej wielkości:
- według schematu pokazanego na Rys. 3. lub
 - wartość U_b oszacować dla prądu $I_b \approx 0.1 \cdot I_{max}$, gdzie I_{max} to maksymalna wartość zmierzonego natężenia prądu przewodzenia diody.
5. Dla każdej z badanych diod odczytać z wykresu wartości U_b . Wyznaczając $u(U_b)$ uwzględnić niepewności otaczające każdy z punktów charakterystyki. Otrzymane wyniki zestawić w formie tabeli.
6. Dla kierunku zaporowego wykonać w jednym układzie współrzędnych wykres rodziny zależności natężenia prądu zaporowego od napięcia przykładanego do badanych diod.
7. Dokonać oceny zgodności otrzymanych charakterystyk z przewidywaniami wzoru Shockley'a. Dla każdej z badanych diod wykonać próbę identyfikacji półprzewodnika w oparciu o oszacowaną wartość U_b .

O.2. DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE (LED)

1. Dla jednej z badanych diod wykonać przykład obliczenia średniej wartości U_{min} :

$$U_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{min,i}}{n} \quad (26)$$

2. Wykonać przykład oszacowania złożonej (uwzględniającej metody A i B) niepewności $u(U_{min})$:

$$u(U_{min}) = \sqrt{(U(U))^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n (U_{min} - U_{min,i})^2}{n \cdot (n-1)}\right)^2} \quad (27)$$

Dla powyższego oszacowania wartość $U(U)$ obliczamy według wzoru (24) dla $U=U_{min}$.

3. Dla jednej z badanych diod wykonać przykład obliczenia wartości λ :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_{min}} \quad (28)$$

4. Wykonać przykład oszacowania $u(\lambda)$:

$$u(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial U_{min}} \cdot u(U_{min})\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{2 \cdot h \cdot c}{e \cdot U_{min}^2} \cdot u(U_{min})\right)^2} = \lambda \frac{u(U_{min})}{U_{min}} \quad (29)$$

5. Dla diody z pkt.3. wykonać przykład obliczenia wartości E_G :

$$E_G = e \cdot U_{min} \quad (30)$$

Wartość E_G podać w jednostkach SI [J] i w [eV].

6. Wykonać przykład oszacowania $u(E_G)$:

$$u(E_G) = \sqrt{\left(\frac{\partial E_G}{\partial U_{min}} \cdot u(U_{min})\right)^2} = \sqrt{(e \cdot u(U_{min}))^2} = e \cdot u(U_{min}) \quad (31)$$

7. Wykonać obliczenia dla pozostałych diod a otrzymane wartości zapisać w Tabeli Wyników.

TABELA WYNIKÓW

DIODA LED	$U_{min} \pm u(U_{min})$	$\lambda \pm u(\lambda)$	$E_G \pm u(E_G)$
	[V]	[nm]	[eV]
IR (infrared)			
R (red)			
G (green)			
B (blue)			
UV (ultraviolet)			

8. Dokonać oceny wyznaczonych wartości długości fal λ z ich barwowym opisem diod przez producenta oraz z własnym wrażeniem wzrokowym obserwacji emitowanego światła. Sformułować wniosek wynikający z porównania wyznaczonych szerokości przerwy energetycznej E_G złącz p-n badanych diod z energią kwantów emitowanego przez nie światła.

O.3. CZĘŚĆ FAKULTATYWNA

- Wykonać instrukcję O.1. W przypadku diod LED - tylko jej część .
- W przypadku diod LED wykonać instrukcję O.2.
- Dla jednej z badanych diod wykonać przykład obliczenia wartości $\ln(I)$ i przykład oszacowania $u(\ln(I))$:

$$u(\ln(I)) = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln(I)}{\partial I} \cdot u(I)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \cdot u(I)\right)^2} = \frac{u(I)}{I} \quad (32)$$

- Wykonać pozostałe obliczenia, uzupełniając otrzymanymi wartościami Tabelę Wyników:

TABELA WYNIKÓW

U	$U(U)$	$\ln(I)$	$U(\ln(I))$
[V]	[V]	[-]	[-]
...		...	
...		...	
...		...	

Obliczając $\ln(I)$ należy użyć wartości I wyrażonych w [A].

- Osobno dla każdej z badanych diod wykonać wykres zależności wartości logarytmu naturalnego z natężenia $\ln(I)$ prądu przewodzenia diody od przyłożonego napięcia U .
- Na pierwszym wykresie poprowadzić styczną do prostoliniowej części zależności oraz konstrukcję do wyznaczenia wartości R_s (patrz Rys. 8.).
- Z użyciem funkcji REGLINP (arkusz Excel) wyznaczyć i zapisać w Tabeli Wyników wartości parametrów równania stycznej:

$$\ln(I) = a \cdot U + b \quad (33)$$

TABELA WYNIKÓW 2

wartość	nachylenie		odcięta		miara jakości dopasowania
	a	u(a)	b	u(b)	R ²
	$\left[\frac{1}{V}\right]$	$\left[\frac{1}{V}\right]$	[-]	[-]	[-]
przed zaokrągleniem					
po zaokrągleniu					

- Wykonać przykład obliczenia wartości współczynnika doskonałości M złącza p-n diody:

$$M = \frac{1}{a \cdot \Theta} \quad (34)$$

- Wykonać przykład oszacowania $u(M)$:

$$u(M) = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \Theta} \cdot u(\Theta)\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{2}{a^2 \cdot \Theta} \cdot u(a)\right)^2 + \left(-\frac{2}{a \cdot \Theta^2} \cdot u(\Theta)\right)^2} = M \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(\Theta)}{\Theta}\right)^2} \quad (35)$$

- Wykonać przykład obliczenia wartości zastępczego prądu nasycenia I_s złącza p-n diody:

$$I_s = e^b \quad (36)$$

11. Wykonać przykład oszacowania $u(I_s)$:

$$u(I_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial I_s}{\partial b} \cdot u(b)\right)^2} = \sqrt{(e^b \cdot u(b))^2} = I_s \cdot u(b) \quad (37)$$

12. Na pozostałych wykresach wykonać czynności z pkt. 6-7. oraz obliczenia według pkt. 8-11., zapisując w Tabeli Wyników otrzymane wartości:

TABELA WYNIKÓW

DIODA	M	$u(M)$	R_s	I_s	$u(I_s)$
	$[-]$	$[-]$	$[\Omega]$	$[A]$	$[A]$
1					
2					
3					

13. Nie szacować wartości niepewności $u(R_s)$.

14. Dla każdej z badanych diod podać typ mechanizmu odpowiedzialnego za przepływ ładunków elektrycznych przez złącze p-n. Dla jednej z diod i trzech wartości natężenia $I[A]$ prądu przewodzenia dla stanów pracy diody: próg przewodzenia, połowa zakresu I_{max} , oraz I_{max} , oszacować względną procentową wartość straty energii E_{strat} rozpraszanej w postaci ciepła Q_T w jednostce czasu $\Delta t = 1$ s.

$$E_{strat} = \frac{Q_T}{U \cdot I} \cdot 100 = \frac{I^2 \cdot R_s}{U \cdot I} \cdot 100 = \frac{100 \cdot I \cdot R_s}{U} \quad [\%] \quad (38)$$

Otrzymane wartości zaokrąglić do 2-ch cyfr znaczących.

	próg przewodzenia I_b	w połowie zakresu $0,5 \cdot I_{max}$	dla / maksymalnego I_{max}
$E_{strat} [\%]$			

Oceń zależną od stanu pracy diody wielkość strat na ciepło.

LITERATURA

- [1] JEPIFANOW G. I.: Fizyczne podstawy mikroelektroniki, WNT, Warszawa 1976.
- [2] VAN DER ZIEL A.: Podstawy fizyczne elektroniki ciała stałego, WNT, Warszawa 1980.
- [3] BOBROWSKI Cz.: Fizyka – Krótki Kurs, WNT, Warszawa 1995.
- [4] OREAR J.: Fizyka t.2, WNT, Warszawa 1993.
- [5] Kittel C.: Introduction to Solid State Physics, 6th Ed., New York: John Willey, 1986, s. 185.
- [6] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.