



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaak

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Dioda stabilizacyjna, stabilizator

- Dioda prostownicza, zastosowania
- Energetyczny model pasmowy złącza
- Przebieg złącza P-N
- Dioda stabilizacyjna
- Stabilizator parametryczny



Dioda prostownicza



Diody przeznaczone do prostowania prądu przemiennego (małych częstotliwości).

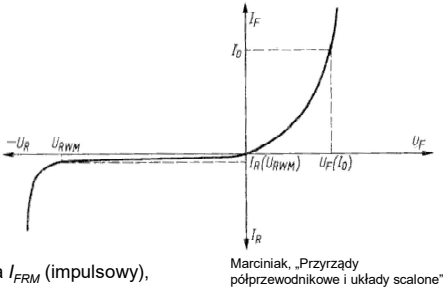
Parametry

• charakterystyczne:

- napięcie przewodzenia U_F przy określonym prądzie przewodzenia $I_F (I_0)$,
- prąd wsteczny I_R przy napięciu U_{RWM} ,

• dopuszczalne parametry graniczne:

- maksymalny średni prąd przewodzenia I_0 ,
- powtarzalny szczytowy prąd przewodzenia I_{FRM} (impulsowy),
- maksymalne napięcie wsteczne U_{RWM} ,
- maksymalna moc strat (admisyjna) P_{max} ,
- rezystancja termiczna R_{th} ,
- maksymalna temperatura złącza T_{jmax} ,
- typowa pojemność złączowa,
- inne.



Diody prostownicze:

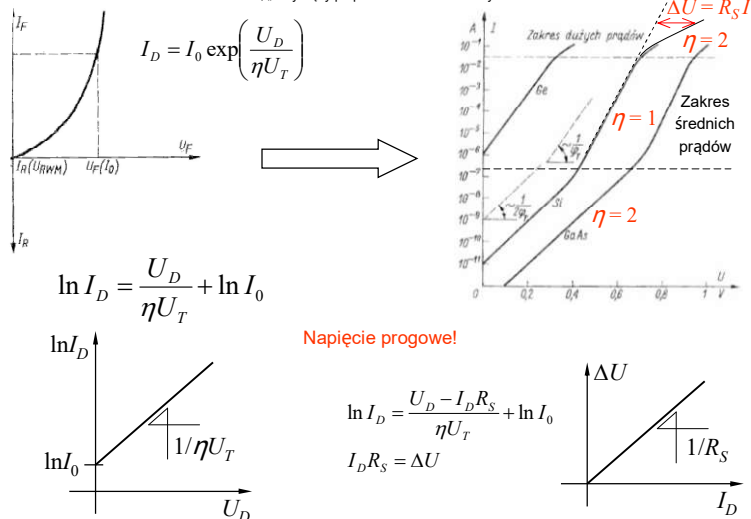
- małej mocy, $P_a < 1 \text{ W}$,
- średniej mocy, $1 \text{ W} < P_a < 10 \text{ W}$,
- dużej mocy, $P_a > 10 \text{ W}$.



Pomiar charakterystyki diody

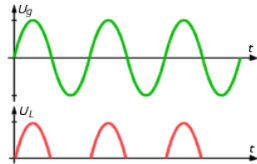
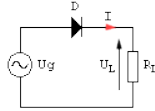


Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

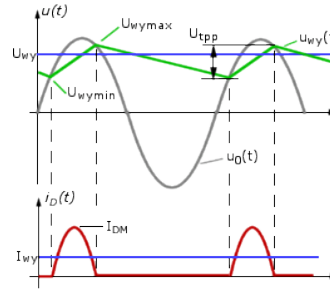
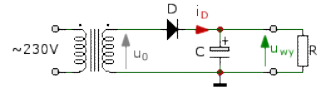




Prostownik jednopołówkowy



$$\begin{aligned}\overline{u_L} &= \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} U_L \sin \omega t dt = \frac{U_L}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin 2\pi f t dt = \\ &= \frac{U_L}{2\pi} \cos 2\pi f t \Big|_0^{\pi} = \frac{U_L}{2\pi} (1 - (-1)) = \frac{U_L}{\pi}\end{aligned}$$



$$\tau = R_L C \Rightarrow u_{tpp} \searrow$$

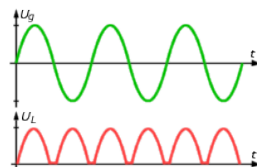
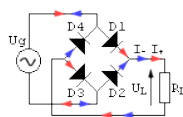
<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

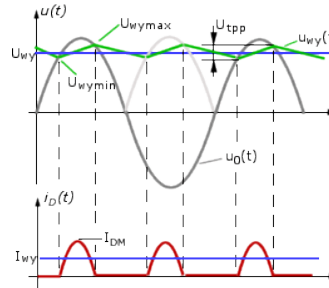
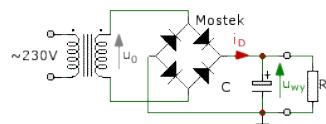
5



Prostownik dwupołówkowy



Mała amplituda tętnień: $R_L \cdot C \gg 1/f$



<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

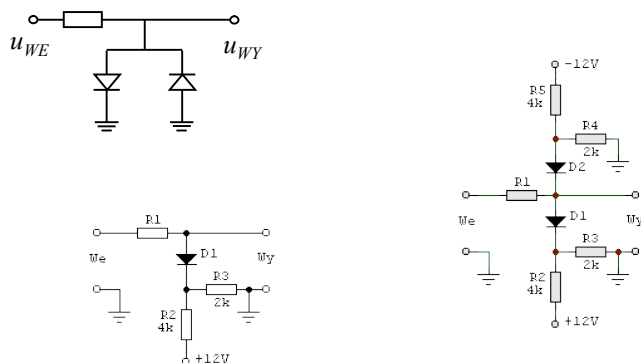
6



Ogranicznik diodowy



Ogranicza wzrost napięcia wyjściowego powyżej określonej wartości



<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

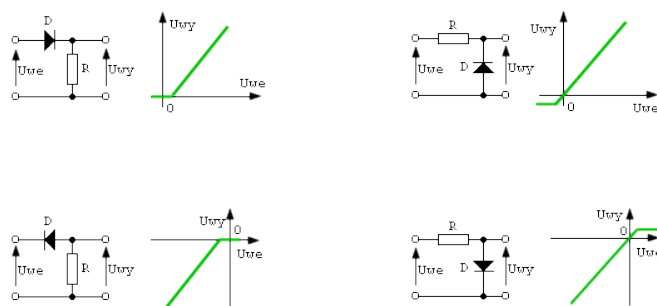
7



Przełącznik diodowy



Klucz – nieliniowy dzielnik napięcia złożony z rezystora i diody



Układy kształtowania charakterystyki przejściowej.

<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

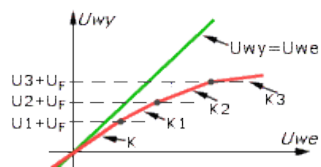
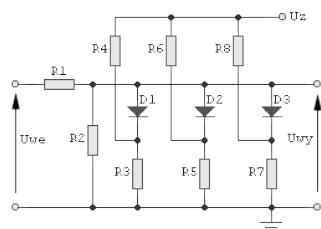
8



Diodowe układy funkcyjne



Układ o nieliniowej charakterystyce



$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad K_1 = \frac{R_2 \parallel R_3 \parallel R_4}{R_1 + R_2 \parallel R_3 \parallel R_4} \quad K_2 = \frac{R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \parallel R_6}{R_1 + R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \parallel R_6}$$
$$K_3 = \frac{R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \parallel R_6 \parallel R_7 \parallel R_8}{R_1 + R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \parallel R_6 \parallel R_7 \parallel R_8}$$
$$U_1 = U_z \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad U_2 = U_z \frac{R_5}{R_5 + R_6} \quad U_3 = U_z \frac{R_7}{R_7 + R_8}$$

<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

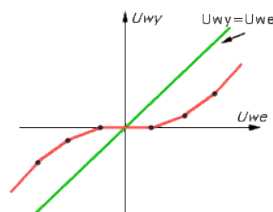
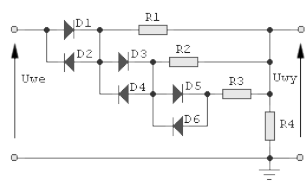
9



Diodowe układy funkcyjne



Układ z symetryczną charakterystyką



<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

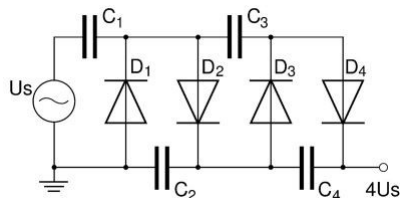
10



Powielacz napięcia

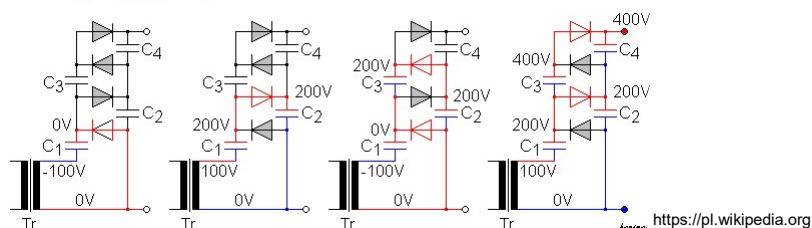


Transformuje napięcie zmienne na stałe o wyższej wartości



kaskada Villarda

Zastosowanie: źródła wysokiego napięcia stałego o niewielkiej (ok. 1 mA) wydajności prądowej. Wydajność prądowa zależy od częstotliwości impulsów ze źródła.



Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

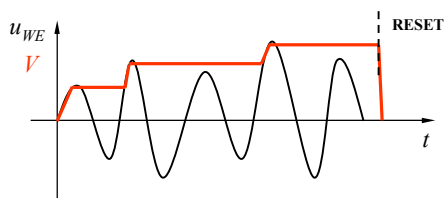
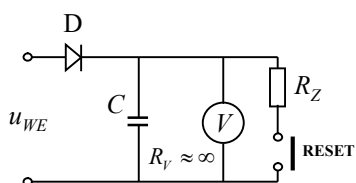
11



Detektor wartości szczytowej



Pozwala mierzyć woltomierzem prądu stałego wartość amplitudy przebiegów zmiennych



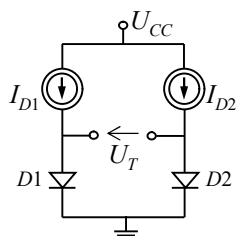
Pojemność C ładowana jest przez diodę, duża rezystancja wewnętrzna woltomierza uniemożliwia jej szybkie rozładowanie. Krótkotwałe zwarcie przycisku RESET powoduje rozładowanie pojemności z małą stałą czasową $\tau = R_Z C$ i przygotowanie układu do nowych pomiarów.

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

12



Diodowy czujnik temperatury



$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{U_D}{\eta U_T}\right) - 1 \right] \quad U_T = \frac{kT}{q}$$

$$U_D = \eta U_T \ln \frac{I_D}{I_0}$$

$$U_T = U_{D1} - U_{D2} = \frac{\eta k T}{q} \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}}$$

$$\frac{dU_T}{dT} = \frac{\eta k}{q} \ln \frac{I_{D1}}{I_{D2}}$$

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

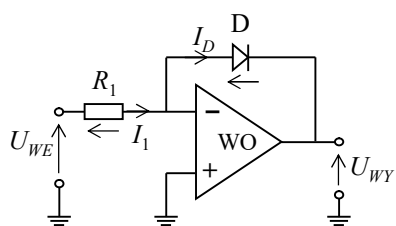
13



Wzmacniacz logarytmujący



Wzmacniacz logarytmujący



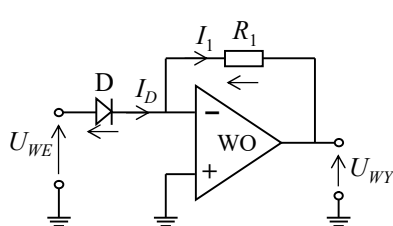
$$I_1 = I_D \quad U_{WE} = I_1 R_1 \quad U_{WY} = -U_D$$

$$I_1 = \frac{U_{WE}}{R_1} = I_0 \exp\left(\frac{-U_{WY}}{\eta U_T}\right)$$

⇓

$$U_{WY} = -\eta U_T \ln\left(\frac{U_{WE}}{R_1 I_0}\right)$$

Wzmacniacz delogarytmujący



$$I_1 = I_D \quad U_{WE} = U_D \quad U_{WY} = -I_1 R_1$$

$$U_{WY} = -R_1 I_0 \exp\left(\frac{U_{WE}}{\eta U_T}\right)$$

Elementy elektroniczne I – zastosowania diod

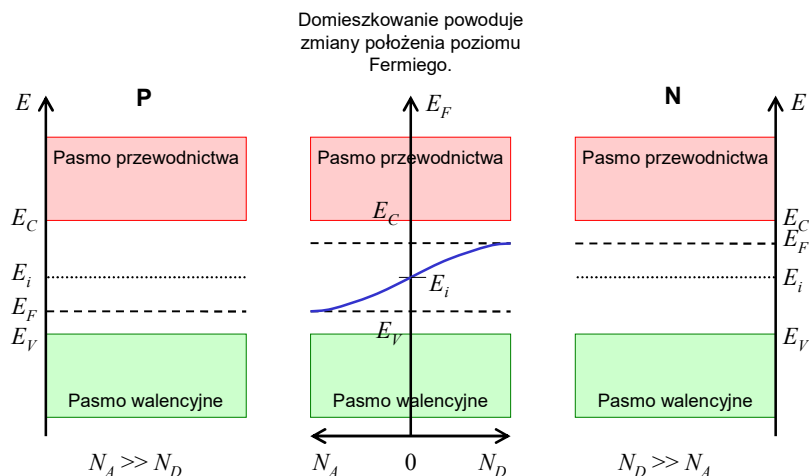
14



Energetyczny model pasmowy złącza



Przed połączeniem obszarów P i N



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

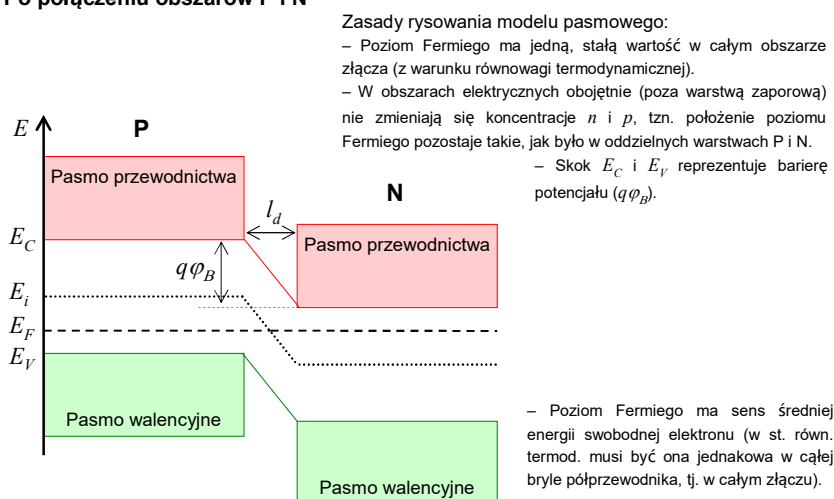
15



Energetyczny model pasmowy złącza



Po połączeniu obszarów P i N



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

16

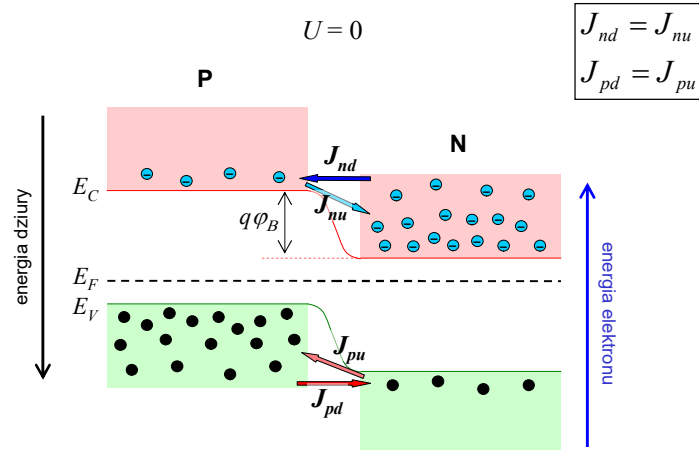


Energetyczny model pasmowy złącza

KPE



Stan równowagi termodynamicznej



Elementy elektroniczne I – złącze P-N

17

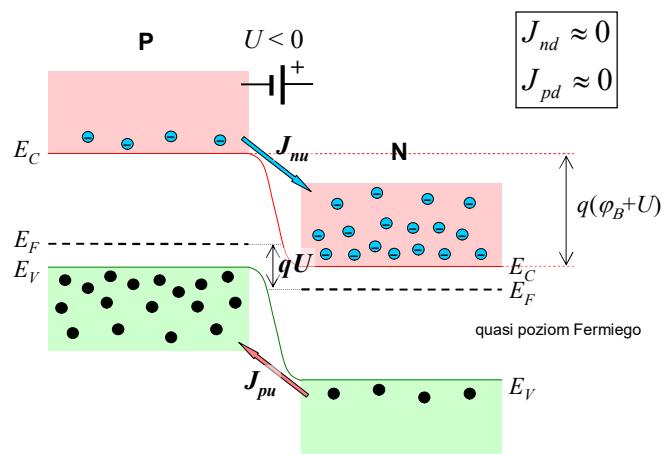


Energetyczny model pasmowy złącza

KPE



Polaryzacja w kierunku zaporowym



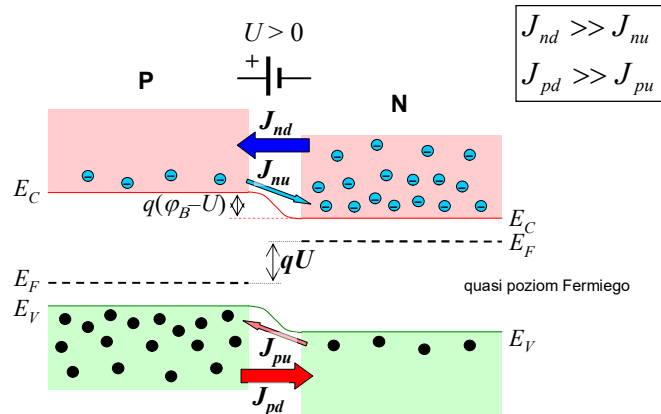
Brak poziomu Fermiego w warstwie zaporowej.

Elementy elektroniczne I – złącze P-N

18



Polaryzacja w kierunku przewodzenia



Brak poziomu Fermiego w warstwie zaporowej – przy polaryzacji złącza jest to obszar o zakłóconej równowadze termodynamicznej – pojęcie poziomu Fermiego nie ma w tym obszarze sensu.

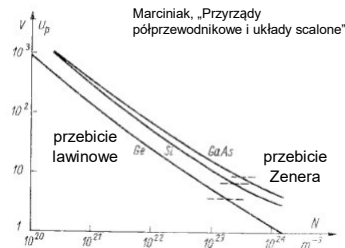


Przebieg złącza P-N



Zjawisko gwałtownego wzrostu prądu przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym napięciem większym niż tzw. napięcie przebicia.

- Przebieg Zenera
- Przebieg lawinowy



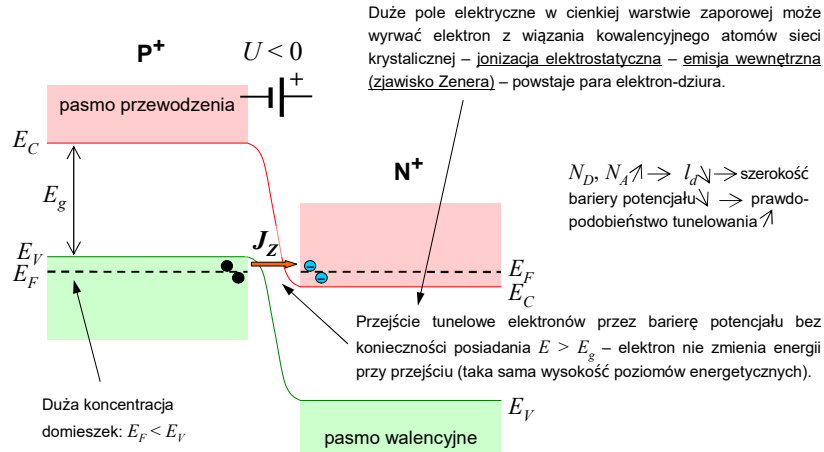
napięcie przebicia	dla krzemu	rodzaj przebicia	poziom domieszkowania
$U_z < 4 \frac{E_g}{q}$	$U_z < 5 \text{ V}$	Zenera	złącza silnie domieszkowane
$4 \frac{E_g}{q} \leq U_z \leq 6 \frac{E_g}{q}$	$5 \text{ V} \leq U_z \leq 7 \text{ V}$	Zenera i lawinowe	średnia koncentracja domieszek
$U_z > 6 \frac{E_g}{q}$	$U_z > 7 \text{ V}$	lawinowe	złącza słabo domieszkowane



Przebiecie złącza P-N



Przebiecie Zenera – zachodzi w złączach silnie domieszkowanych (P^+-N^+)



Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

21

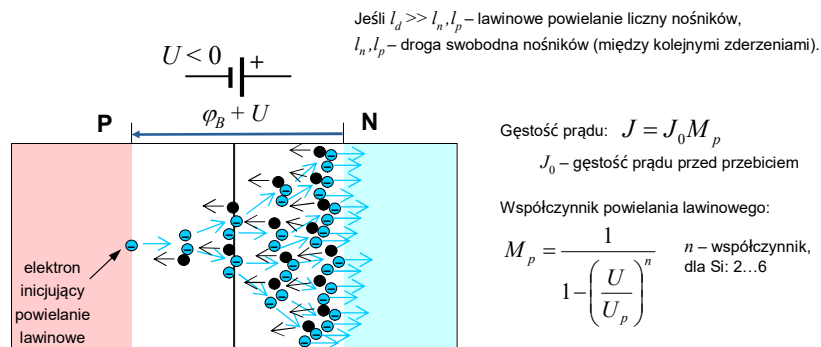


Przebiecie złącza P-N



Przebiecie lawinowe

Silne pole elektryczne rozpędza swobodny nośnik ładunku, który zderza się z atomem sieci krystalicznej – rozerwanie wiązań kowalencyjnych (jonizacja zderzeniowa) – powstaje para elektron-dziura, która również jest przyspieszana i może doprowadzić do kolejnej jonizacji zderzeniowej – powielanie lawinowe.



Oba przebiecia nie powodują bezpośrednio uszkodzenia złącza, dopóki w obwodzie zewnętrznym jest odpowiednie ograniczenie prądu. Brak ograniczenia spowoduje wydzielanie się zbyt dużej mocy (ciepła) i zniszczenie złącza.

Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

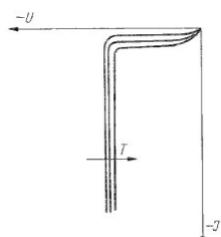
22



Wpływ temperatury na napięcie przebicia



Przebiecie Zenera



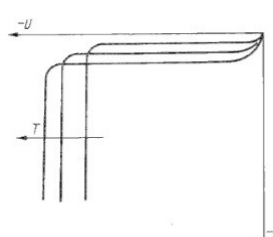
$$TWU_Z < 0$$

Marciniak, „Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

Względna zmiany napięcia stabilizacji od temperatury:

$$TWU_Z = \frac{1}{U_Z} \frac{\Delta U_Z}{\Delta T}$$

Przebiecie lawinowe



$$TWU_Z > 0$$

Mechanizm wpływu temperatury na przebiecie:

$$T \uparrow \rightarrow E_g \downarrow \rightarrow I_d \downarrow \rightarrow I_D \uparrow$$

$$T \uparrow \rightarrow \text{amplituda drgań atomów sieci} \uparrow \rightarrow$$

$$\text{prawdopodobieństwo zderzeń} \uparrow \rightarrow I_{n,p} \downarrow \rightarrow$$

$$E_{Kn,p} \downarrow \rightarrow \text{powielanie lawinowe} \downarrow \rightarrow I_D \downarrow$$



Dioda stabilizacyjna



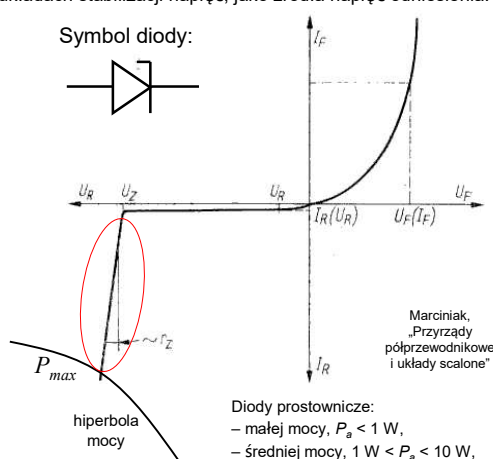
Diody przeznaczone do zastosowań w układach stabilizacji napięć, jako źródła napięć odniesienia.

Parametry

- **charakterystyczne:**
 - napięcie przewodzenia U_F przy określonym prądzie przewodzenia I_F (I_F),
 - prąd wsteczny I_R przy określonym napięciu wstecznym U_R ,
 - napięcie stabilizacji (Zenera) U_Z zwykle dla $I = 0,1 I_{Zmax}$,
 - TWU_Z temp. współczynnik nap. stab.,
 - rezystancja dynamiczna r_Z ,
- **dopuszczalne graniczne:**
 - maksymalny stały prąd przewodzenia I_{Fmax} ,
 - maksymalny prąd stabilizacji I_{Zmax} ,
 - maksymalna moc strat P_{max} (dla $T_a = 25^\circ C$),
 - maksymalna temperatura złącza T_{jmax} .

$$I_{Zmax} = P_{max} / U_Z$$

Symbol diody:



Marciniak, „Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

Diody prostownicze:

- małej mocy, $P_a < 1 W$,
- średniej mocy, $1 W < P_a < 10 W$,
- dużej mocy, $10 W < P_a < 100 W$,
- bardzo dużej mocy, $P_a > 100 W$.



Dioda stabilizacyjna



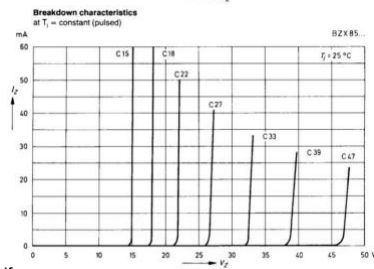
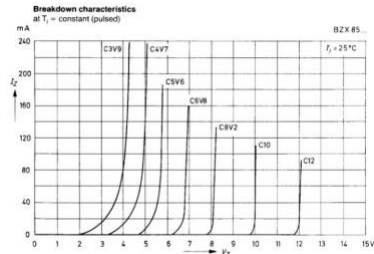
Parametry – BZX85 ...



Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

	Symbols	Values	Units
Zener current see Table "Characteristics"			
Power dissipation at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	1.3 ¹⁾	W
Junction temperature	T_j	200	$^\circ\text{C}$

Type	Zener voltage range ¹⁾		Dynamic resistance		Reverse leakage current		Temp. coefficient of Zener voltage TK _{V_Z}		
	V _{Z0}	I _{Z0} for V _{Z0} ²⁾	r _z	r _{z0} at I _{Z0}	I _{Z0} at V _Z	V _Z at I _{Z0}			
BZX85C 2V7	2.7	80	2.5 ... 2.9	<20	<400	1	<150	1	-0.08 ... -0.05
BZX85C 3V0	3.0	80	2.8 ... 3.2	<20	<400	1	<100	1	-0.08 ... -0.05
BZX85C 3V3	3.3	70	3.1 ... 3.5	<20	<400	1	<40	1	-0.08 ... -0.05
BZX85C 3V6	3.6	60	3.4 ... 3.8	<15	<500	1	<20	1	-0.08 ... -0.05
BZX85C 3V9	3.9	60	3.7 ... 4.1	<15	<500	1	<10	1	-0.07 ... -0.02
BZX85C 4V3	4.3	50	4.0 ... 4.6	<13	<500	1	<3	1	-0.07 ... +0.01
BZX85C 4V7	4.7	45	4.4 ... 5.0	<13	<600	1	<3	1	-0.03 ... +0.04
BZX85C 5V1	5.1	45	4.8 ... 5.4	<10	<500	1	<1	1.5	-0.01 ... +0.04
BZX85C 5V6	5.6	45	5.2 ... 6.0	<7	<400	1	<1	2	0 ... +0.045
BZX85C 6V2	6.2	35	5.8 ... 6.6	<4	<300	1	<1	3	+0.01 ... +0.055
BZX85C 6V8	6.8	35	6.4 ... 7.2	<3.5	<300	1	<1	4	+0.015 ... +0.06



<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/good-ark/BZX85C6V8.pdf>

Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

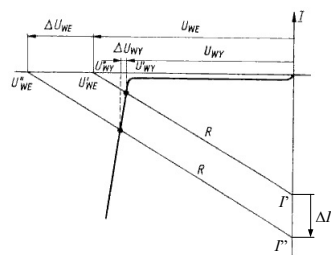
25



Dioda stabilizacyjna



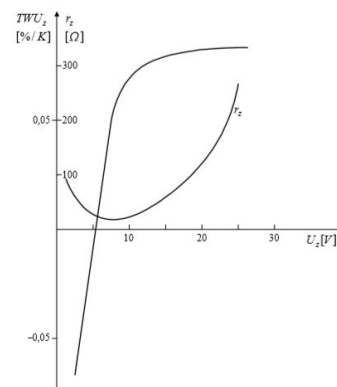
Właściwości stabilizacyjne – rezystancja dynamiczna



r_z określa nachylenie charakterystyki diody w zakresie przebicia.

$$r_z = \frac{\partial U_Z}{\partial I_Z} = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \bigg|_{(U_Z, I_Z)}$$

Dla idealnej diody: $r_z \rightarrow 0$



S. Kuta „Elementy i układy elektroniczne”

Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

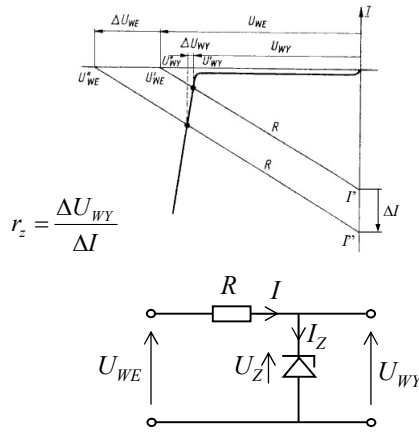
26



Dioda stabilizacyjna



Właściwości stabilizacyjne

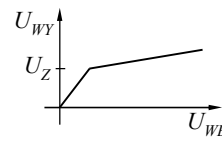


$$U_{WE} - IR - U_{WY} = 0$$

$$I = \frac{U_{WE} - U_{WY}}{R}$$

$$\Delta I = \frac{\Delta U_{WE} - \Delta U_{WY}}{R}$$

$$\begin{matrix} \Delta U_{WY} - \text{małe} \\ \Delta I - \text{duże} \end{matrix} \Rightarrow \Delta U_{WE} - \text{duże}$$



Zadaniem stabilizatora jest zmniejszenie amplitudy u_{WE} do małych amplitud u_{WY} (stabilizowanego), czyli uniezależnienie u_{WY} od zmian u_{WE} oraz od zmian obciążenia.



Dioda stabilizacyjna



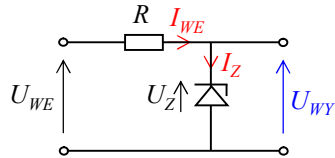
Modele odcinkowo liniowe



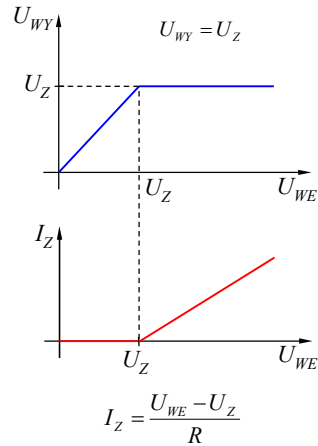
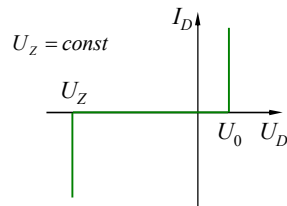
Stabilizator parametryczny



Stabilizator bez obciążenia



idealna charakterystyka diody stabilizacyjnej



Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

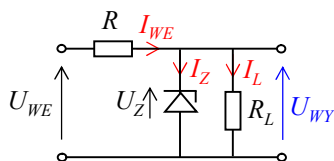
29



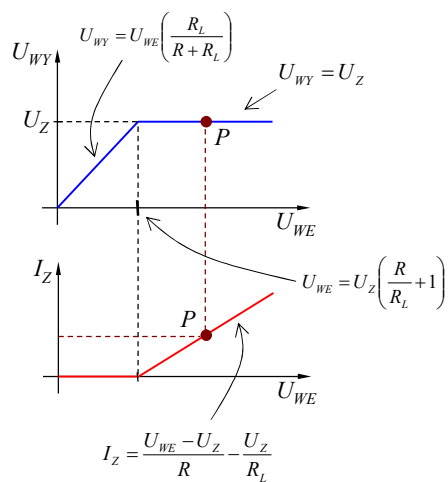
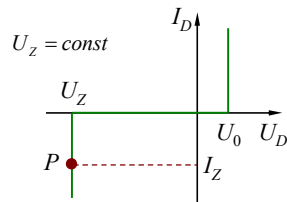
Stabilizator parametryczny



Stabilizator z obciążeniem



idealna charakterystyka diody stabilizacyjnej



Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

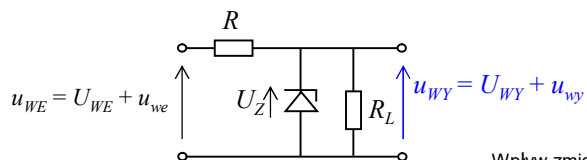
30



Stabilizator parametryczny

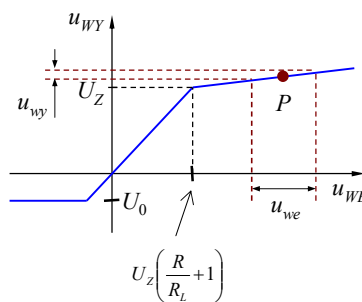
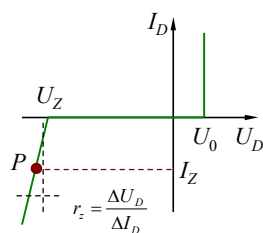


Stabilizator z obciążeniem



Wpływ zmian u_{WE} na u_{WY} przy $R_L = \text{const}$

rzeczywista charakterystyka diody stabilizacyjnej



Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

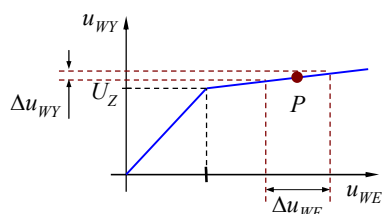
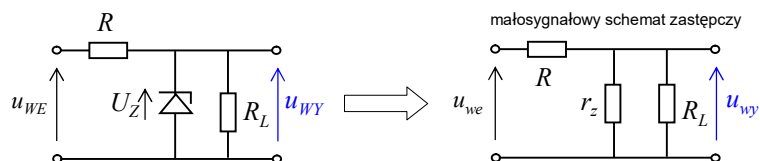
31



Stabilizator parametryczny



Współczynnik stabilizacji napięciowej (rzeczywista ch-ka diody stabilizacyjnej)



$$S_U = \frac{\Delta u_{WY}}{\Delta u_{WE}} \bigg|_{R_L = \text{const}} = \frac{r_z \parallel R_L}{R + r_z \parallel R_L}$$

Dla $r_z \ll R_L$ i $R \gg r_z$ (zwykle):

$$S_U = \frac{r_z}{R + r_z} = \frac{1}{\frac{R}{r_z} + 1} = \frac{r_z}{R}$$

Im mniejszy
tym lepiej!

Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

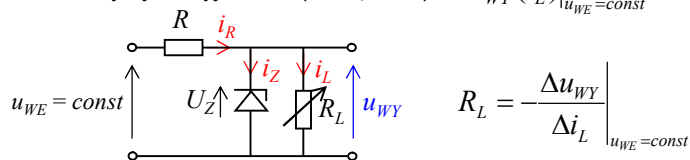
32



Stabilizator parametryczny



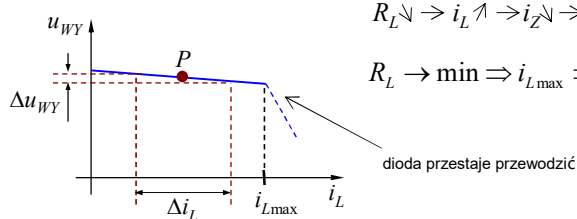
Charakterystyka wyjściowa (obciążenia) $u_{WY}(i_L)|_{u_{WE}=const}$



$$R_L \rightarrow \infty \Rightarrow i_L = 0 \Rightarrow i_Z = i_{Zmax} \Rightarrow u_{WYmax}$$

$$R_L \searrow \Rightarrow i_L \nearrow \Rightarrow i_Z \searrow \Rightarrow u_{WY} \searrow$$

$$R_L \rightarrow \min \Rightarrow i_{Lmax} \Rightarrow i_Z = i_{Zmin} \Rightarrow u_{WYmin}$$



Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

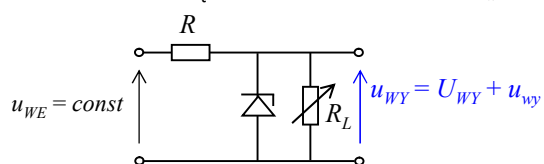
33



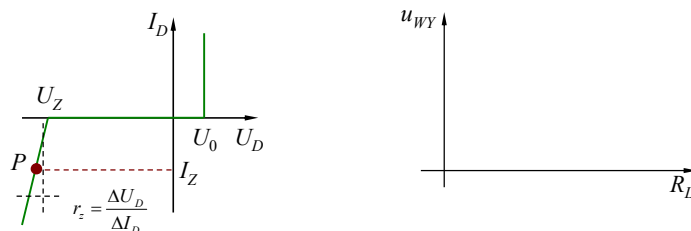
Stabilizator parametryczny



Stabilizator z obciążeniem – wpływ zmian R_L na u_{WY} przy $u_{WE}=const$



rzeczywista charakterystyka diody stabilizacyjnej

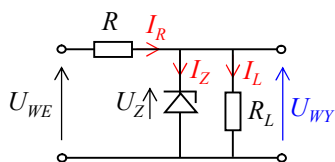


Elementy elektroniczne I – dioda stabilizacyjna

34



Projektowanie stabilizatora



$$I_R = I_Z + I_L$$

$$R_L \rightarrow \infty \Rightarrow I_Z = I_{Z\max} \rightarrow$$

$$P_{Z\max} \text{ (dane kat.)} \Rightarrow I_{Z\max} = \frac{P_{Z\max}}{U_Z}$$

$$I_{Z\min} \rightarrow \text{(z ch-ki diody)} U_D = U_Z - \text{dioda w zakresie stabilizacji}$$

$$U_{WE} = ?$$

$$R_{\min} = \frac{U_{WE} - U_Z}{I_{Z\max}} \quad - \text{ogranicza } I_Z \text{ do bezpiecznej wartości (} I_{Z\max} \text{)}$$

$$\text{Dla } R_L < \infty: I_{Z\min} \rightarrow I_{L\max} \Rightarrow I_{Z\max} = I_{Z\min} + I_{L\max}$$