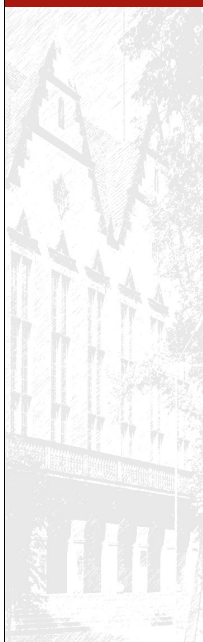




Politechnika Wrocławska



## Układy elektroniczne I

Jerzy Witkowski

p.132b C-4

Konsultacje:



## Warunki zaliczenia:

- Pozytywne zaliczenie „Projektu I”
- Pozytywna ocena z „kolokwium”
- Końcowa ocena z przedmiotu:  
    średnia z powyższych  
    ze wskazaniem na kolokwium



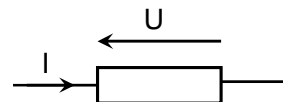
## Literatura:

1. P.Horowitz, H.Hill, Sztuka elektroniki, WKŁ 2004.
2. W.Tietze, Ch.Schenk, Układy półprzewodnikowe, WNT 1996.
3. S. Kuta, Elementy i układy elektroniczne, AGH 2000.
4. J. Baranowski, G. Czajkowski; Układy elektroniczne, WNT 2004
5. Z. Nosal, J. Baranowski, Układy elektroniczne. Warszawa, WNT 1998
6. A. Guziński, Liniowe elektroniczne układy analogowe. Warszawa, WNT 1993.
7. J. Pawłowski; Podstawowe układy elektroniczne :nieliniowe układy analogowe, WKŁ 1979
8. J. Pawłowski; Podstawowe układy elektroniczne :wzmacniacze i generatory, WKŁ 1979
9. T. Zagajewski; Układy elektroniki przemysłowej, WKŁ 1978



## Model rezystora (opornika)

$$U = RI$$

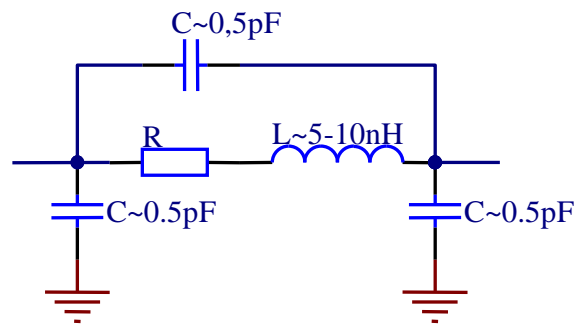


Istotne parametry:

- Rezystancja ( $0.1\Omega - 10M\Omega$  szeregi E12(10%)? i E24(5%)?)
- Moc ( $1/8 - 5W$ )
- Maksymalne napięcie ( $100V - 1000V$ )
- Stabilność termiczna ( $10ppm/deg - 500ppm/deg$ ) termistory ?
- Stabilność czasowa (np..  $1\%/1000h$ )
- Indukcyjność pasożytnicza (indukcyjność doprowadzeń  $6-8nH$ )
- Pojemność ( $0.1pF - 5pF$ )
- Nieliniowość ( $R=R(U)$  rzędu  $0.01\%/V$ )
- Szumy (inny wykład)  $U_{RMS}^2 = 4kTRB$

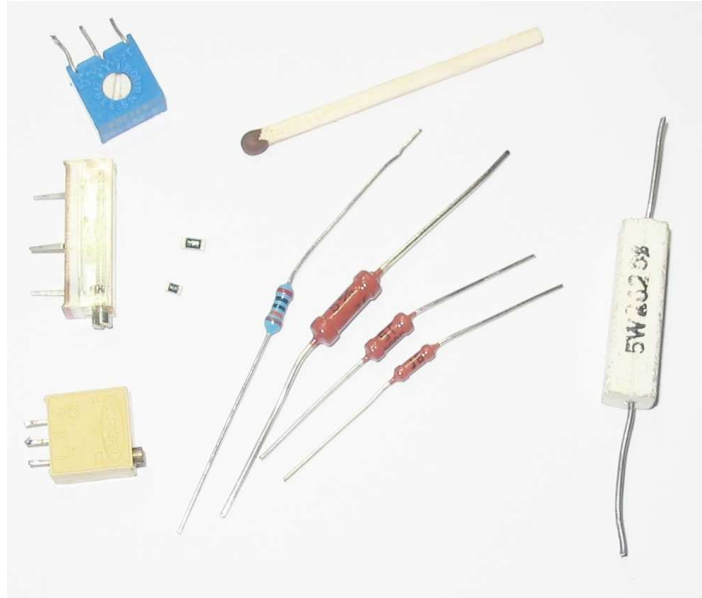


## Rezystory różnych typów





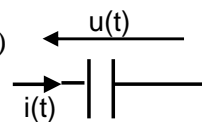
# oporniki





## Model pojemności (kondensatora)

$$i(t) = C \frac{du}{dt}; \quad u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + u(o)$$

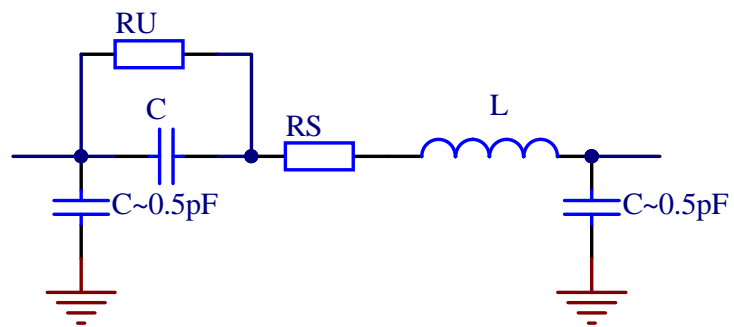


Istotne parametry:

- Pojemność (0.1pF – 5F; szeregi E6 – E12)
- Napięcie przebicia (5V – 10kV)
- Polaryzacja (dla kondensatorów elektrolitycznych !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!)
- Rezystancja upływu (0 - 10μA)
- Stratność (rodzaj dielektryka i upływność)
- Rezystancja szeregową
- Stabilność termiczna (rodzaj dielektryka np. NPO....)
- Prąd maksymalny (szczególnie impulsowy)
- Indukcyjność doprowadzeń



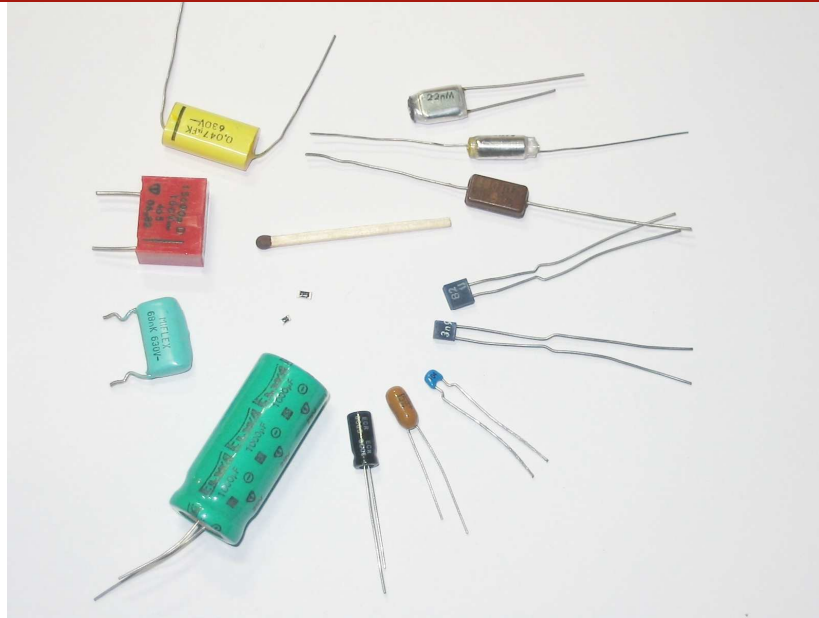
## Różne rodzaje kondensatorów







## Różne rodzaje kondensatorów





## Różne rodzaje kondensatorów

Typ kondensatora	Zakres pojemności	Napięcie przebicia [V]	Dokładność	Stołość temperaturowa	Upływność	Uwagi
Mikowy	1 pF-0,01uF	100-600	dobra		mała	doskonały; dobry w układach w.cz.
Ceramiczny	10pF-1uF	50-30k	kiepska	Zależy od rodzaju ceramiki	średnia	mały, niedrogi, bardzo popularny
Poliestrowy	0,001uF-50jF	50-600	dobra	kiepska	mała	tani, dobry, bardzo popularny
Polistyrenowy (styrofleksowy)	10pF-2,7uF	100-600	b. dobra	dobra	b.mała	wysokiej jakości, o dużych wymiarach, dobry do filtracji sygnałów
Poliwęglanowy	100pF-30uF	50-800	b. dobra	znakomita	mała	wysokiej jakości, o małych wymiarach
Polipropylenowy	100pF-50uF	100-800	b. dobra	dobra	b.mała	wysokiej jakości, mała absorpcja dielektryczna
Teflonowy	1 nF-2uF	50-200	b. dobra	najlepsza	b.b.mała	wysokiej jakości, najmniejsza absorpcja dielektryczna

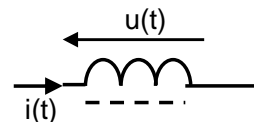


Typ kondensatora	Zakres pojemności	Napięcie przebicia [V]	Dokładność	Stołość temperaturowa	Uplywność	Uwagi
Szkłany	10pF-1000pF	100-600	dobra		b.mała	duża stołość długoczasowa pojemności
Porcelanowy	100 pF-0,1uF	50-400	dobra	dobra	mała	dobry, duża stołość długoczasowa pojemności
Tantalowy	0,1 uF-500uF	6-100	kiepska	kiepska		duże pojemności, polaryzowany, małe wymiary; mała indukcyjność własna;
Elektrolityczny aluminiowy	0,1uF-1F	3-600	zła	okropna	b. duża	filtry w zasilaczach; polaryzowany, krótki czas życia
Buck-up	0,1 F-10F	1,5-6	kiepska	kiepska	mała	do podtrzymywania za-wartości pamięci; du-ża rezystancja szerego-wa
Olejowy	0,1 uF-20uF	200-10k			mała	filtry wysokonapięcio-we; duże wymiary; długi czas życia
Próżniowy	1 pF-5nF	2k-36k			b.mała	Układy w.cz.



## Model indukcyjności (cewki)

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt + i(0); \quad u(t) = L \frac{di}{dt}$$

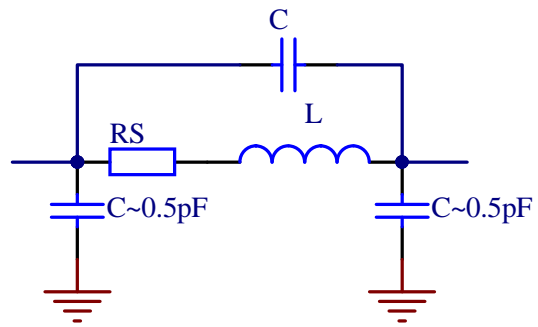


Istotne parametry:

- Indukcyjność (szereg E12 tylko dla dławików małej dobroci)
- $A_L$  [nH/zw<sup>2</sup>] - stała rdzenia ( $L = A_L \cdot z^2$ )
- Rezystancja szeregową - dobroć  $Q = \omega L / R_s$
- Naskórkowość
- Nieliniowość i histereza rdzenia, straty w rdzeniu
- Maksymalny prąd (nasycenie materiału rdzenia –  $B_{max}=0,2 - 1.6T$ )
- Maksymalne napięcie pracy (przebiecie międzyuzwojeniowe)



## Model cewki

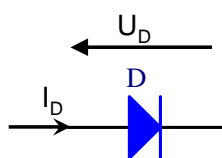


## Różne rodzaje cewek i transformatorów





## Model diody półprzewodnikowej Shockley'a



$$I_D = I_{gr0} \left( \exp \left( \frac{U_D}{2\phi_T} \right) - 1 \right) + I_0 \left( \exp \left( \frac{U_D}{\phi_T} \right) - 1 \right)$$

$I_{gr0}$  – prąd generacyjno-rekombinacyjny

$I_0$  – prąd nasycenia

$\phi_T$  – potencjał termiczny elektronów  $=kT/e=26\text{mV}$  dla  $T=300\text{K}$

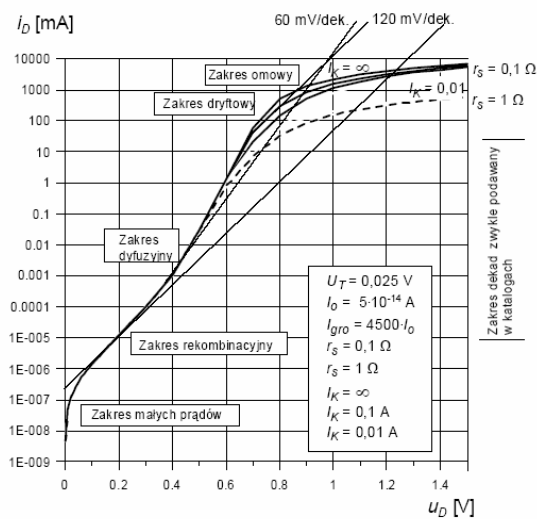
$$I_D = I_S \left( \exp \left( \frac{U_D}{n\phi_T} \right) - 1 \right)$$

$I_S$  – efektywny prąd nasycenia ( $10^{-18} \div 10^{-9}\text{A}$ )

$n$  – współczynnik niedoskonałości ( $1 \div 2$ )



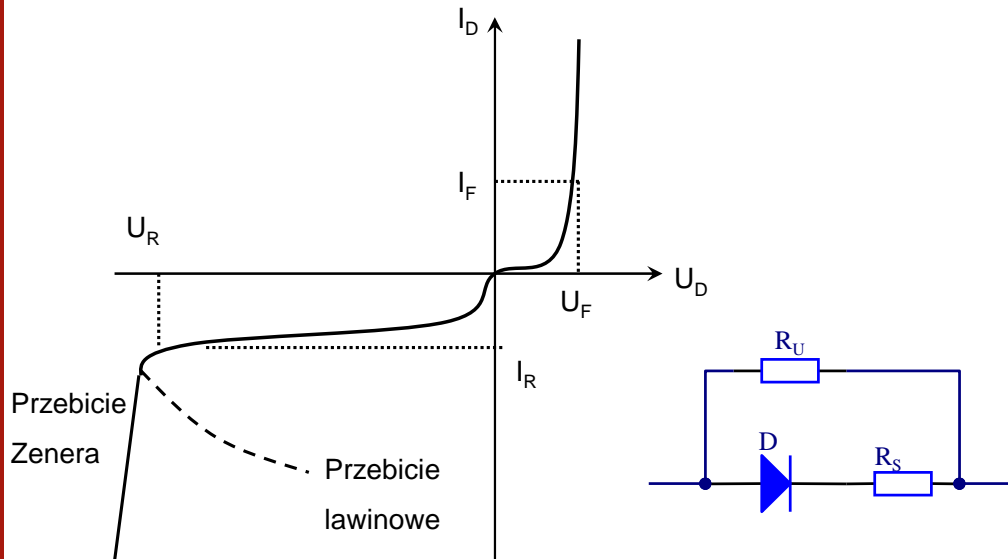
## Dioda półprzewodnikowa $U_D > 0$ model podstawowy





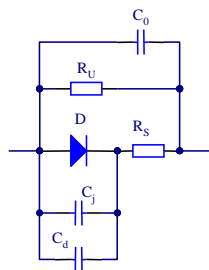


## Dioda półprzewodnikowa stałoprądowa charakterystyka rzeczywista





## Dioda półprzewodnikowa model dynamiczny



$R_U$  - rezystancja upływu,

$R_S$  - rezystancja szeregową,

$C_0$  - pojemność obudowy,

$C_d$  - pojemność dyfuzyjna, (stan przewodzenia),

$C_j$  - pojemność złączowa (stan zaporowy)

$$C_d = \frac{I_D \tau_t}{n \phi_T}$$

Dla  $\omega \tau_t \ll 1$

$\tau_t$  - czas „przejścia”

$n$  - wsp. niedoskonałości

$\phi_T$  - potencjał termiczny

$$C_j = \frac{C_j(U_D = 0)}{\left(1 - U_D / V_j\right)^m}$$

$C_j(0)$  - pojemność bez polaryzacji,

$U_D$  - napięcie na diodzie ( $< 0$ ),

$V_j$  - potencjał dyfuzyjny („wbudowany”) ( $0,5 \div 1V$ )

$m$  -  $1/3 \div 1/2$



## Model diody półprzewodnikowej

### Parametry katalogowe

- $I_{F??}$  - prąd przewodzenia @ (jak mierzony ?)
  - F - forward - przewodzenia
  - AV(M) - average - średni (maksymalny)
  - RMS - real mean square - skuteczny
  - SM - surge maximum - impulsowy maksymalny (niepowtarzalny)
- $U_F$  - napięcie przewodzenia @ (jak... ?)
- $I_R$  - prąd wsteczny @ (jak... ?)
  - R(M) - reverse (maximum) - wsteczny (maksymalny)
- $U_R$  - napięcie wsteczne @ (jak.. ?)
  - RRM - repetitive reverse maximum
  - SM - surge maximum - impulsowy maksymalny (niepowtarzalny)



## Model diody półprzewodnikowej

### Parametry katalogowe inne

- $t_{rr}$  - recovery time @ (jak... ?)
- $Q_C$  - ładunek gromadzony w złączu
- $P$  - moc
- $I^2dt$  [ $A^2s$ ] („wartość skuteczna prądu”)
- $dV_R/dt$  - szybkość narastania  $U_R$
- Temperatura pracy
- Oporność cieplna



## Model diody półprzewodnikowej

### Parametry katalogowe

Symbol	$U_{RRM}$ [V]	$I_R$ [mA]	$U_F @ I_F$ [V] [A]		$U_{FM} @ I_{FSM}$ [V] [A]		$t_{rr}$ [ns]	$C[pF] @ U_{RRM}$	zastosowanie
1N4002	100	50	0.9	1	2.3	25	3500	15	Dioda prostownicza 1A
1N4007	1000	50	0.9	1	2.3	25	5000	15	Dioda prostownicza 1A – 1000V
BA159	1000	5	1.3	1	1.8	20	500	12/4V	Szybka prostownicza
1N4148	75	25n	1	0.1		4A/1us	4	0.8	Szybka przełączana
1N5819	40	1m	0.4	1	1.2	25	?	40	Prostownicza Shottky
BAT 43	30	100	0.3	0.002	1	0.2	5	5	Shottky
SDT06S60 Silicon-carbide	600	200	1.7	6		21.5	00	15	Szybka, wysokonapięciowa, mocy; Shottky
DSEP12-12A	1200	100	2.7	15		90	40	?	Szybka, wysokonapięciowa, mocy



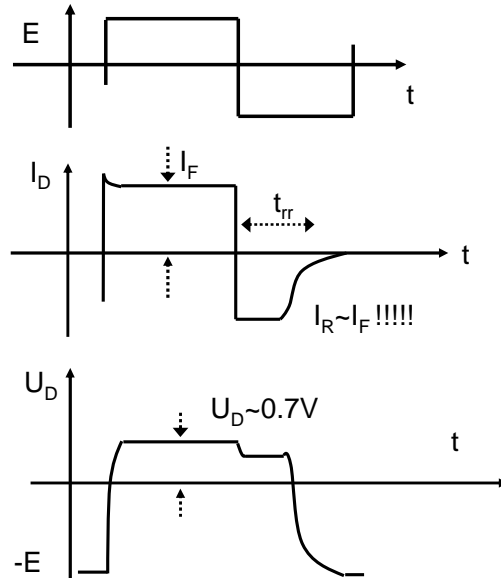
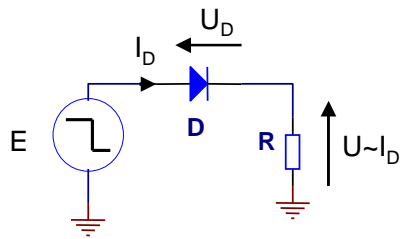
## Diody półprzewodnikowe

### Napięcie przewodzenia dla amatorów

Symbol	$U_F @ I_F$ [V] [A]		$U_F$ [V] @ $I_F=1mA$	$t_{rr}$ [ns]	IR [μA]
1N4002 (prostownicza 100V)	0.9	1	0.5	3500	50
1N4007 (prostownicza 1kV)	0.9	1	0.5	5000	50
BA159 (szybka 1kV)	1.3	1	0.47	500	5
1N4148 (przełączająca)	1	0.1	0.55	4	25nA
1N5819 (Schottky 1A)	0.4	1	0.2	?	1000
BAT43 (Schottky 0.2A )	0.3	0.2	0.25	5	100
SDT06S60 (Schottky mocy)	1.7	6	0.4	000 !!	200
DSEP12-12A (zero $t_{rr}$ )	2.7	15	0.7	40	100
LED IR			0.9		
LED R G Y O			1.3 + 1.6		
LED Blue & White			3.6		



## Model dynamiczny diody recovery time $t_{rr}$





## Dioda zależności temperaturowe

$$I_D = I_s \left( \exp \left( \frac{U_D}{n\phi_T} \right) - 1 \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_D}{dT} &= \frac{n\phi_T}{T} \ln \left( \frac{I_D}{I_s} + 1 \right) - n\phi_T \frac{1}{I_s} \frac{dI_s}{dT} = \\ &= \frac{n\phi_T}{T} \ln \left( \frac{I_D}{I_s} + 1 \right) - \frac{E_G/e}{T} - 3n \frac{\phi_T}{T} \end{aligned}$$

Gdzie:  $E_G$  – przerwa energetyczna (dla Si 1.12eV)

wtedy:

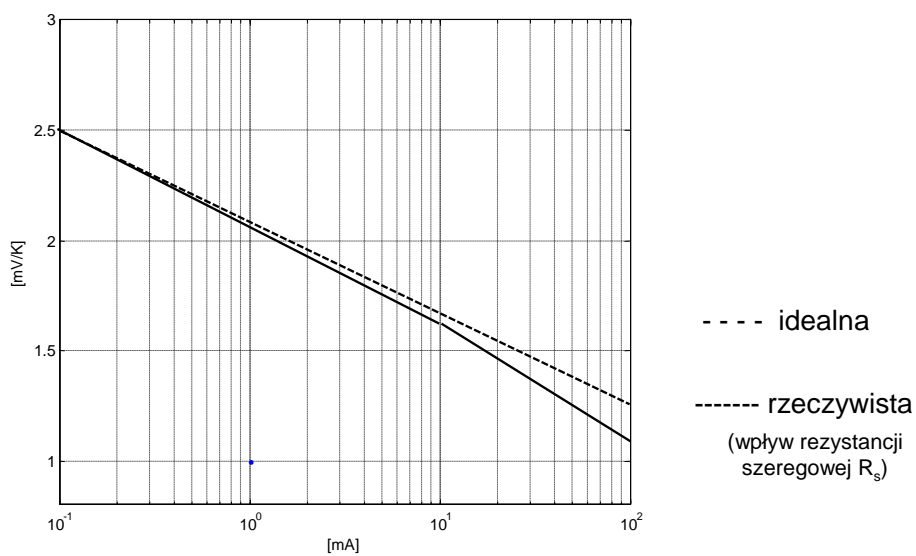
$$\frac{dU_D}{dT} \approx -2mV \quad \text{dla} \quad I_D = 2mA$$





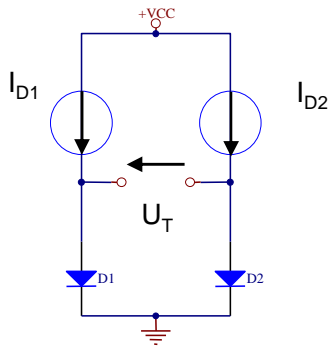
$$\frac{dU_D}{dT}$$

## jako funkcja prądu diody





## Diodowy czujnik temperatury



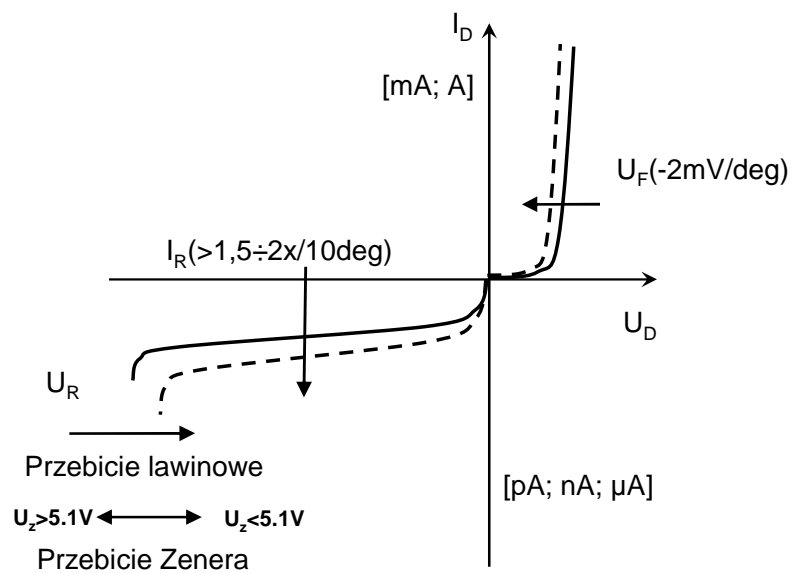
$$I_D = I_s \left( \exp \left( \frac{U_D}{n\phi_T} \right) - 1 \right) \quad \phi_T = \frac{kT}{e}$$

$$U_T = U_{D2} - U_{D1} = n\phi_T \ln \left( \frac{I_{D2}}{I_{D1}} \right)$$

$$\frac{dU_T}{dT} = \frac{nk}{e} \ln \left( \frac{I_{D2}}{I_{D1}} \right)$$



## Dioda - zależności temperaturowe





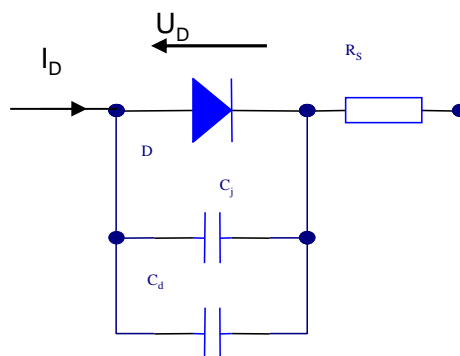
## Model diody półprzewodnikowej model „fizyczny” i SPICE’a

$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{U_D}{n\phi_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_D = I_{BV} \exp\left(-\frac{(BV + U_D)}{n_b\phi_T}\right)$$

$$C_d = \frac{I_D \tau_t}{n\phi_T}$$

$$C_j = \frac{C_j(U_D = 0)}{\left(1 - U_D/V_j\right)^m}$$



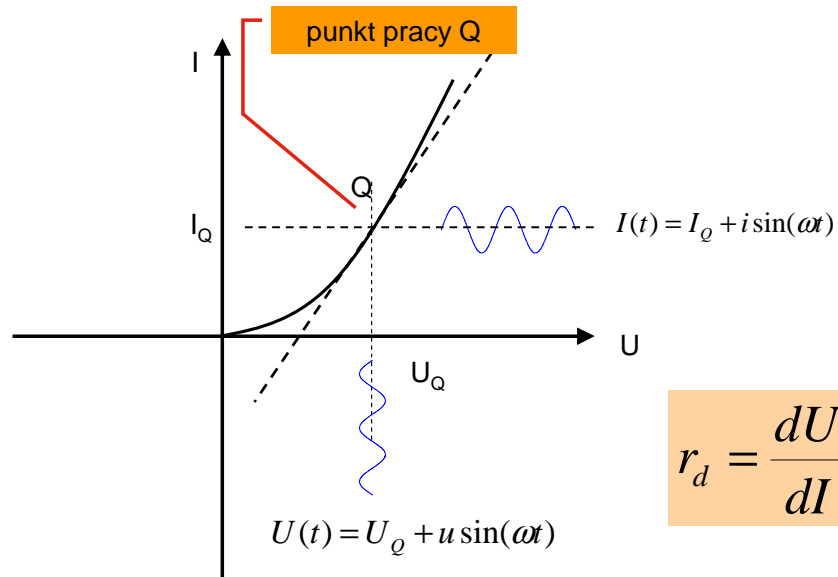


## Model diody półprzewodnikowej model „fizyczny” i SPICE’a

NAZWA	OPIS	J.	(przykładowe wartości)
BV	Napięcie przebicia wstecznego „kolanko charakterystyki”	V	40 -1600
CJO	Pojemność złącza przy zerowym napięciu polaryzacji	F	0
EG	Przerwa energetyczna	eV	1.11
FC	Współczynnik granic linearyzacji pojemności $V_d > 0$		0.5
IBV	Prąd przebicia przy napięciu BV (dodatni)	A	1E-10
IS	Prąd nasycenia	A	1E-14
M	Współczynnik gradientu domieszkowania złącza		0.33 - 0.5
N	Współczynnik emisji		1 - 2
RS	Szeregowa rezystancja pasożytnicza	$\Omega$	0 – 0.5
TT	Czas przelotu	s	5ns - 5 $\mu$ s
VJ	Potencjał złącza (bariery)	V	0.4 – 0.8
XTI	Wykładnik potęgi zależności prądu IS od temperatury		3



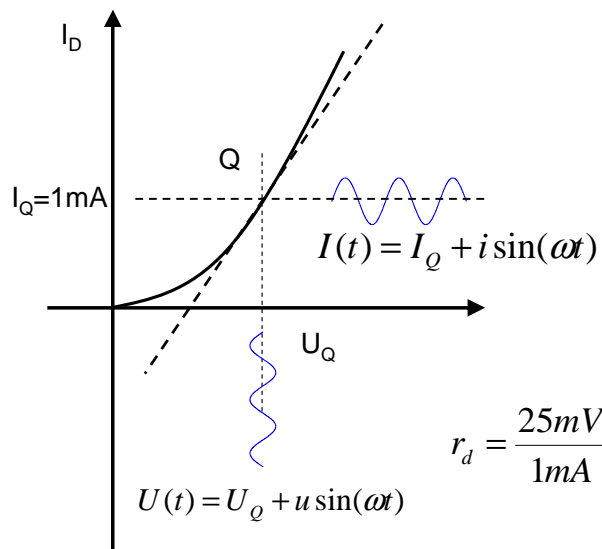
## Model linearyzowany - dynamiczny - małosygnałowy



$$r_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{u}{i}$$



## Dioda - rezystancja dynamiczna małosygnałowa - dynamiczna



$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{U_D}{n\phi_T}\right) - 1 \right)$$

$$r_d = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{I_D=I_Q} = \frac{n\phi_T}{I_D + I_s} \approx \frac{n\phi_T}{I_D}$$

$$r_d = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{I_D=I_Q} \approx \frac{u}{i}$$

$$r_d = \frac{25\text{mV}}{1\text{mA}} = 25\Omega \quad \text{dla } I_D = 1\text{mA}; n = 1$$



## Dioda - rezystancja dynamiczna małosygnałowa - dynamiczna

$$r_d = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{I_D=I_Q} = \frac{n\varphi_T}{I_D + I_s} \approx \frac{n\varphi_T}{I_D}$$

$$r_d = \frac{25mV}{I_D} = \frac{25mV}{1mA} = 25\Omega \quad \text{dla } I_D = 1mA; n = 1$$

$$r_d = \frac{25mV}{0.1mA} = 250\Omega \quad \text{dla } I_D = 100\mu A; n = 1$$

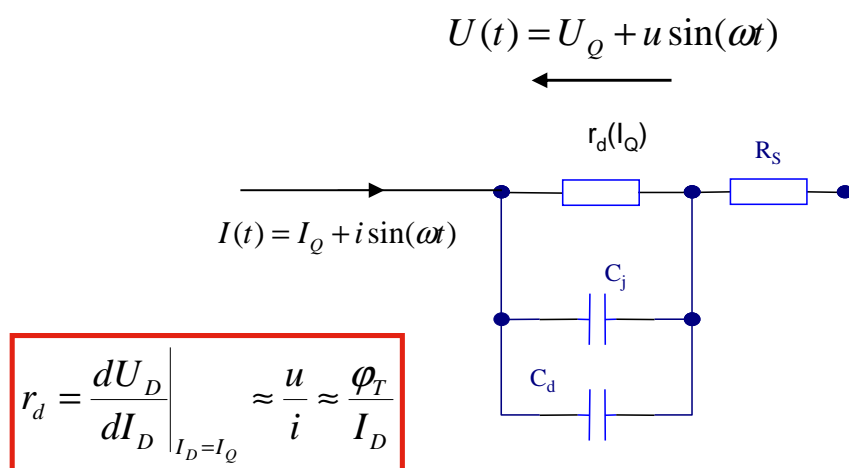
$$r_d = \frac{25mV}{0.01mA} = 2,5k\Omega \quad \text{dla } I_D = 10\mu A; n = 1$$

UMOWNY !!!! Zakres liniowości dla diody wynosi około 25mV



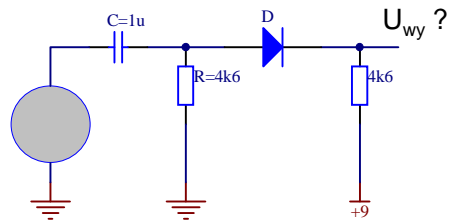


## Dioda - rezystancja dynamiczna małosygnałowa - dynamiczna



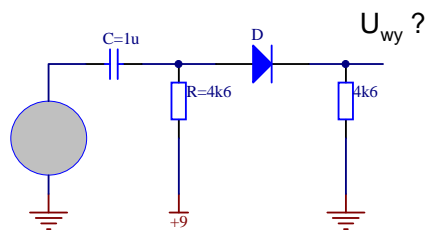


## Dioda przełącznik diodowy



$$r_d \approx \infty$$

BRAK SYGNAŁU NA WYJŚCIU

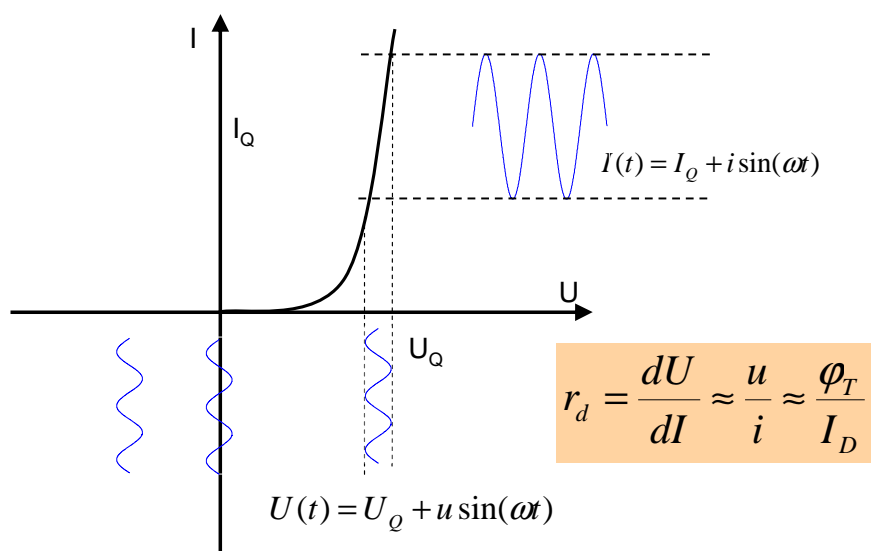


$$r_d \approx 25\Omega$$

JEST SYGNAŁ NA WYJŚCIU

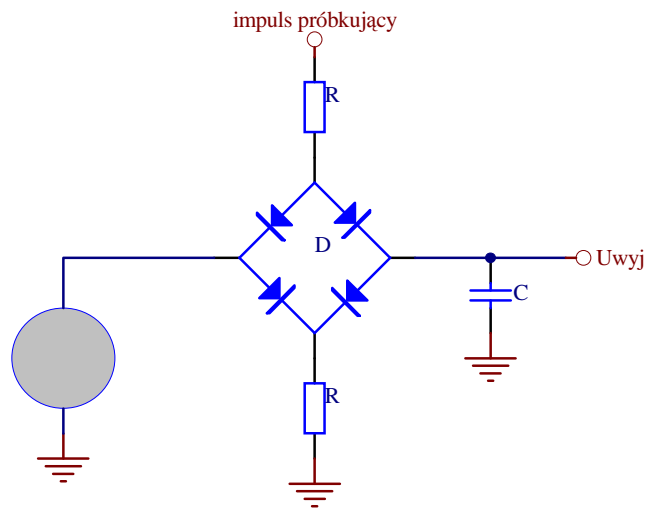


## Model linearyzowany - dynamiczny - małosygnałowy





## Dioda -- klucz mostkowy układ próbkująco - pamiętający



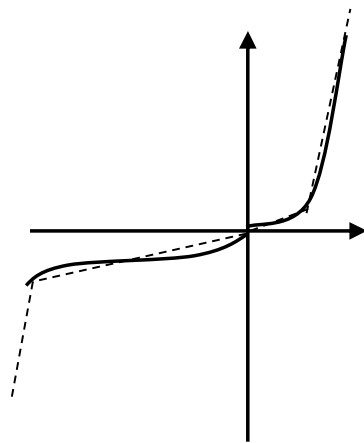


## Dioda modele

- Model fizyczny (Shokley'a)
- Model numeryczny (SPICE)
- Model dynamiczny (małosygnałowy)
- Model odcinkowo liniowy
- Model stałego spadku napięcia
- Model idealny (przetątnik)

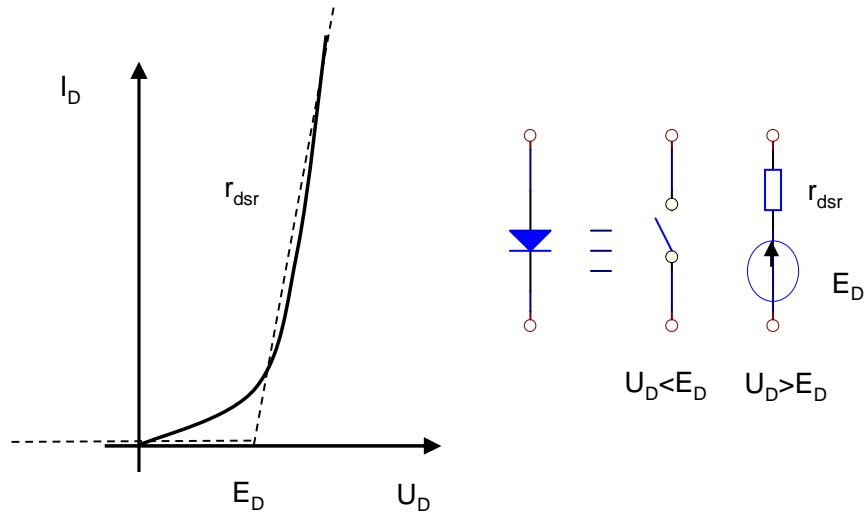


## Model odcinkowo liniowy



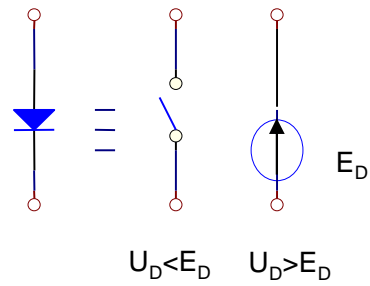
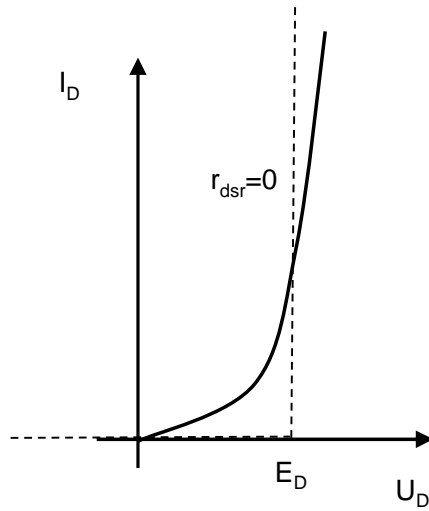


## Model odcinkowo liniowy





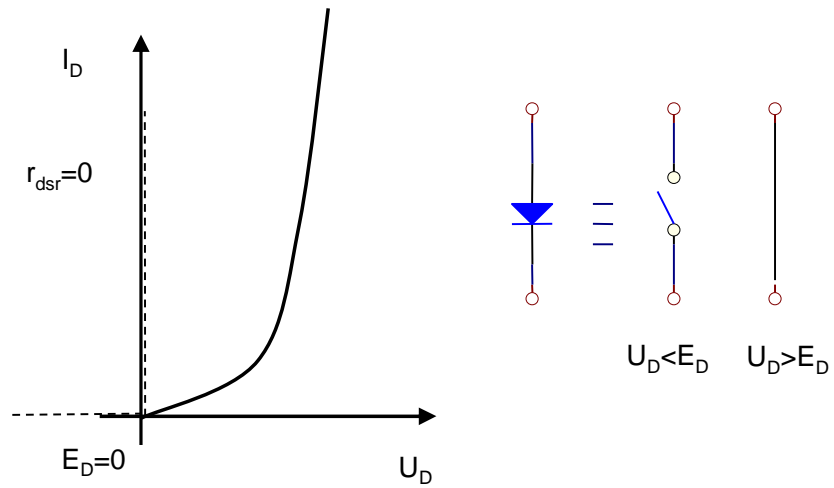
## Model o stałym spadku napięcia







## Model idealny



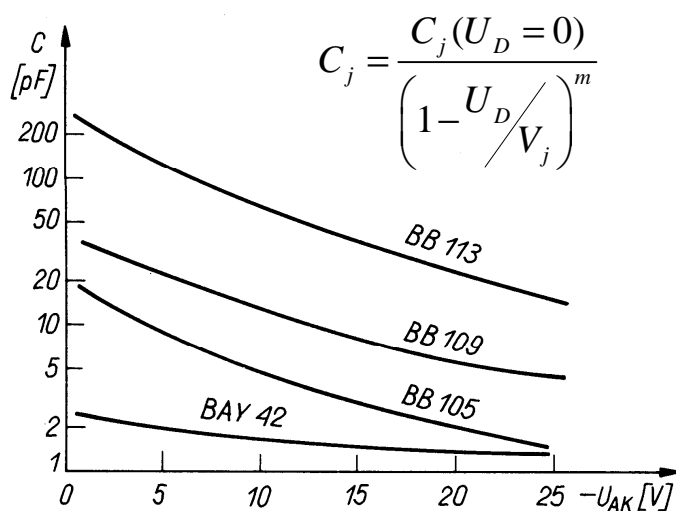


## Inne rodzaje diod

- pojemnościowa
- Zenera
- tunelowa
- wsteczna
- luminescencyjna
- fotodioda
- fotoogniwo



## Dioda pojemnościowa „warikapy” i „waraktory”



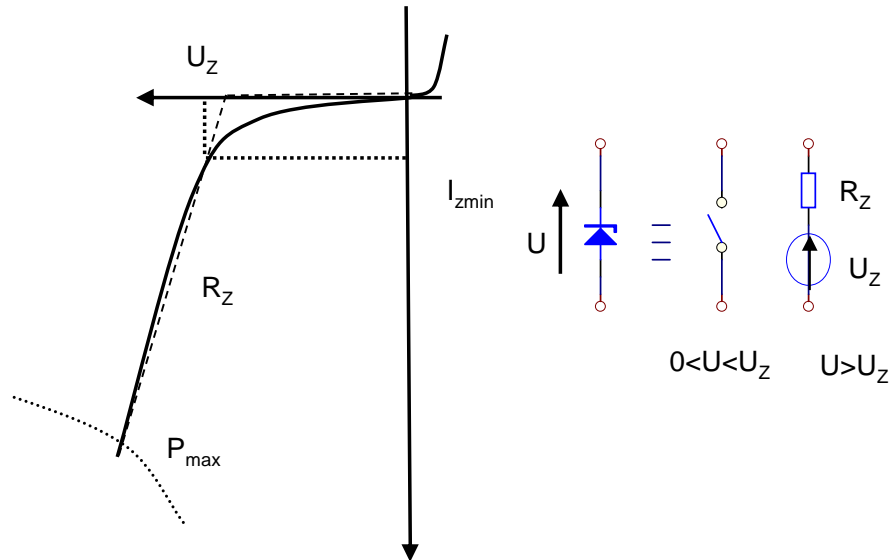
$$C_j = \frac{C_j(U_D = 0)}{\left(1 - U_D/V_j\right)^m}$$

Warikap – dioda o zmiennej pojemności do przestrajania obwodów rezonansowych (BB113,109,105)

Waraktor – dioda o zmiennej reaktancji – element nieliniowy stosowany w mikrofalach



## Dioda stabilizacyjna Zenera



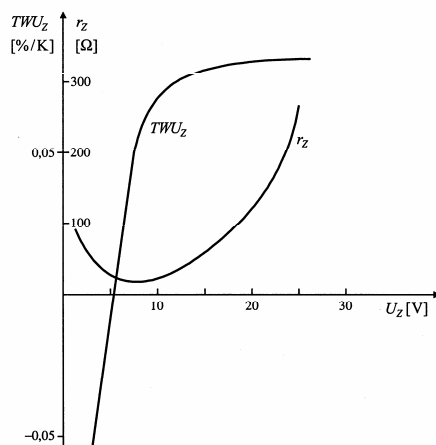


## Dioda stabilizacyjna Zenera główne parametry

- Napięcie Zenera ( $3V3 \div 30V$ ;  $200V \div 240V$ )
- Prąd minimalny ( $3 \div 5 \text{ mA}$ )
- Moc ( $1 - 10W$ )
- Rezystancja dynamiczna ( $10 \div 300\Omega$ )
  - Minimalna dla  $U_Z=7V5$
- Współczynnik temperaturowy ( $-5 \div +15\%/K$ )
  - Zerowy dla  $U_Z \approx 5V1$

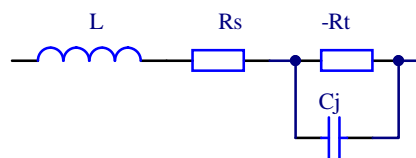
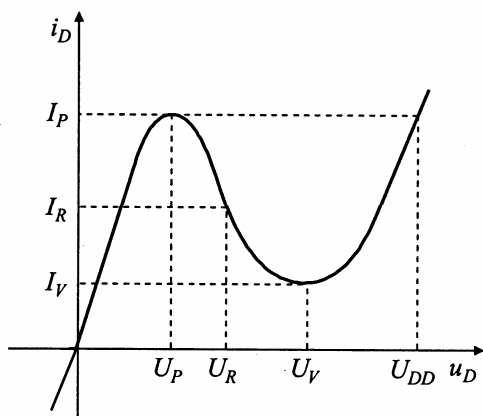


## Dioda stabilizacyjna Zenera wsp. Temperaturowy i rezystancja dynamiczna



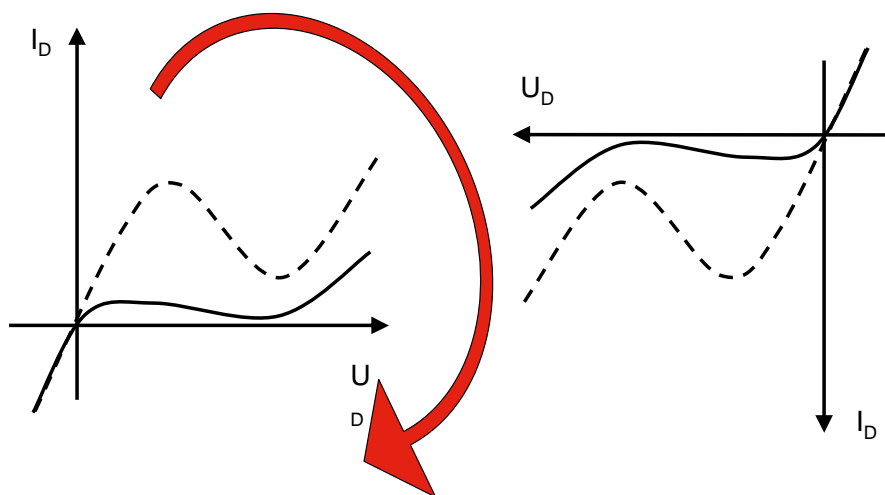


## Dioda tunelowa - wzmacnianie i generacja mikrofal





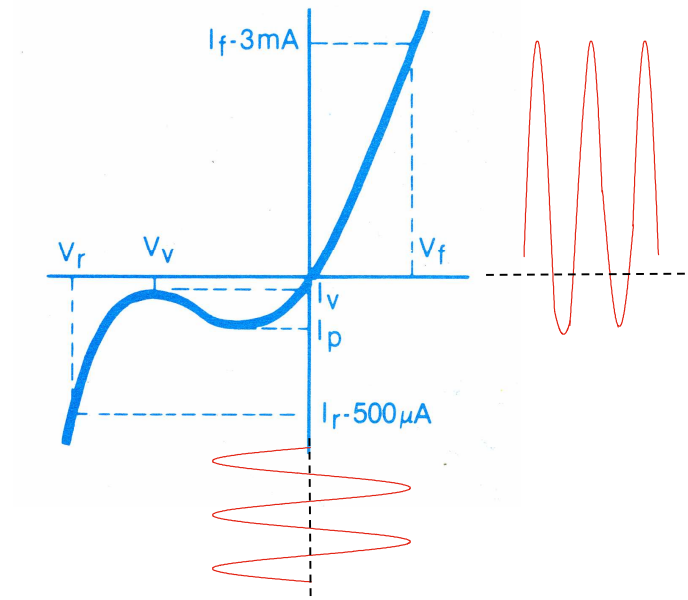
## Dioda wsteczna - detekcja mikrofal





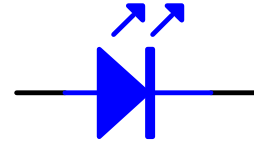


## Dioda wsteczna - detekcja mikrofal





## Diody elektroluminescencyjne LED

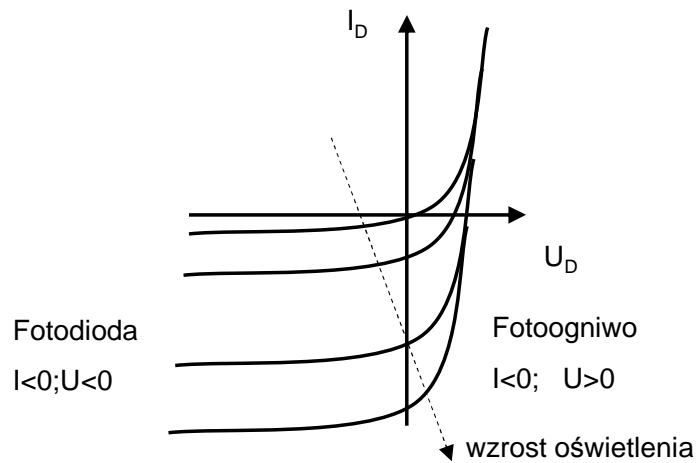


- **Parametry orientacyjne:**

- Długość fali:
  - (400<sub>UV</sub>, 455<sub>B</sub>, 565<sub>G</sub>, 590<sub>Y</sub>, 620<sub>O</sub>, 660<sub>R</sub>, 880<sub>IR</sub>, 940<sub>IR</sub> nm)
- Szerokość spektralna (50 ÷ 200nm)
- Jasność (0.1 ÷ 10000 mcd)
- Kąt świecenia (10 ÷ 90 deg)

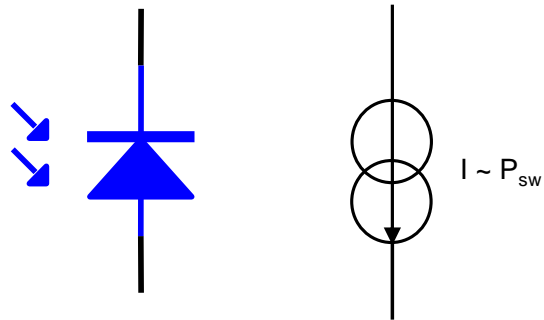


# Fotodioda; Fotoogniwo





# Fotodioda





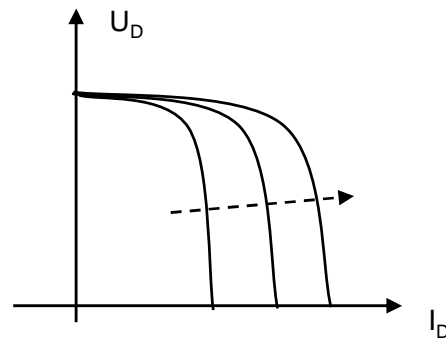
## Fotodioda

- Główne parametry
  - zakres spektralny (UV, VIS, IR)
  - czułość (A/W)- typowo 0.5A/W dla IR
  - czas odpowiedzi (ns ÷  $\mu$ s)
  - pojemność (związana z czasem)
  - uptywność



## Fotoogniwo

- Główne parametry:
  - zakres spektralny
  - napięcie (zależy od rodzaju półprzewodnika - dla Si 0,7V)
  - wydajność prądowa
  - sprawność (5-10%)





## Podsumowanie „główne problemy”

- Podstawowe parametry elementów pasywnych (i ich niedoskonałości),
- Modele diody (Shockley’a, SPICE, małosygnałowy, odcinkowo-liniowy, stałego napięcia, idealny),
- Podstawowe parametry diody
  - typowe zakresy wartości,
  - zmiany parametrów z temperaturą,
- Główne różnice pomiędzy typami diod (Shottky, prostownicza, przełączająca itp..)
- Niektóre diody specjalne i ich parametry (Zenera, pojemnościowa, tunelowa, wsteczna, LED, fotodioda, fotoogniwo),