



# Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Płak

Politechnika Rzeszowska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Podstaw Elektroniki

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



## Plan wykładu

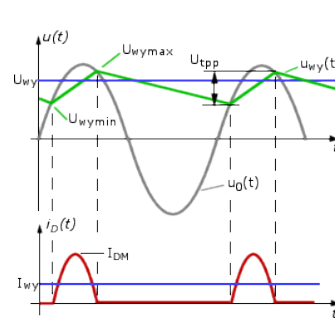
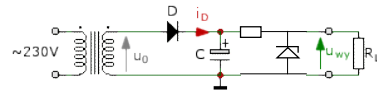


### Pozostałe rodzaje diod, zastosowania

- Stabilizator parametryczny
- Zastosowanie diod stabilizacyjnych
- Dioda tunelowa
- Dioda pojemnościowa
- Złącze m-s (dioda Schottky'ego)
- Diody mikrofalowe (m.in. wsteczne, p-i-n)
- Diody LED



## Prostownik ze stabilizatorem parametrycznym



Wykres nie uwzględnia stabilizatora!

$$U_i \approx U_m$$

$$U_o \approx U_Z$$

$$\Delta u_L < U_{tpp}$$

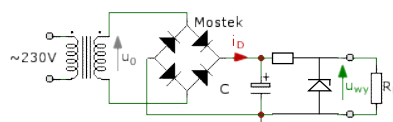
<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowanie diod stabilizacyjnych

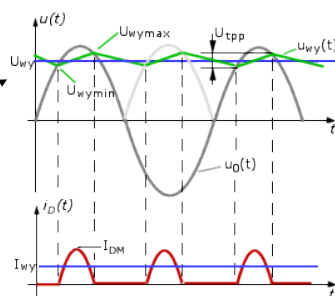
3



## Zasilacz ze stabilizatorem parametrycznym



Wykres nie uwzględnia stabilizatora!



<https://ea.elportal.pl>

Elementy elektroniczne I – zastosowanie diod stabilizacyjnych

4



## Stabilizator parametryczny



### Zastosowanie

- proste zasilacze bez regulacji napięcia wyjściowego,
- napięcie odniesienia w bardziej rozbudowanych stabilizatorach (ze sprzężeniem zwrotnym, czy impulsowych).

### Zalety:

- prostota (najprostszy stabilizator).

### Wady:

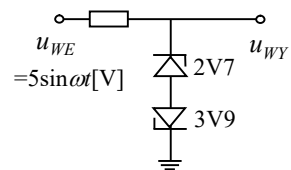
- brak możliwości regulacji napięcia wyjściowego,
- duża moc tracona w rezystorze,
- duża zależność warunków pracy od obciążenia.



## Ogranicznik diodowy



Ogranicza wzrost napięcia wyjściowego powyżej określonej wartości

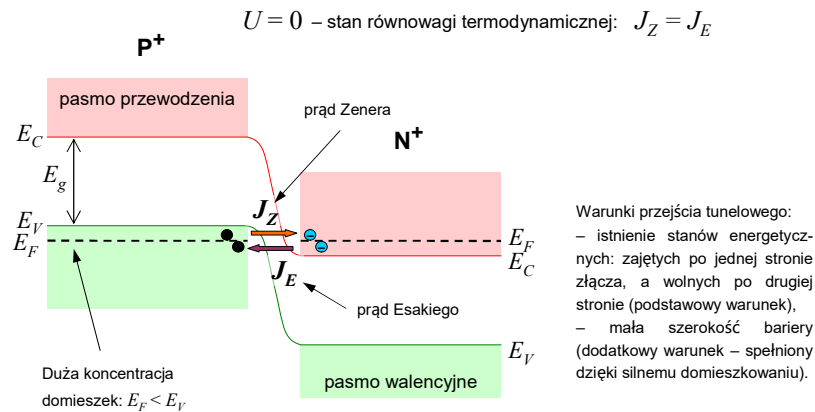




## Dioda tunelowa



Przejście tunelowe – zachodzi w złączach silnie domieszkowanych ( $P^+-N^+$ )



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

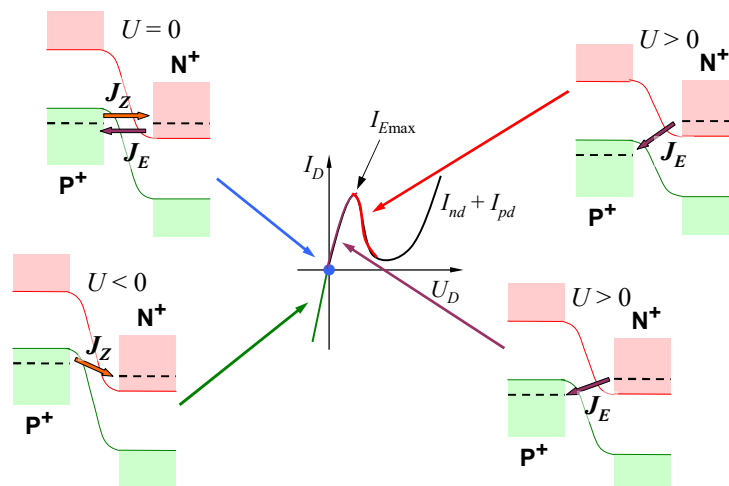
7



## Dioda tunelowa



Przejście tunelowe



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

8

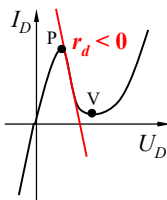


## Dioda tunelowa



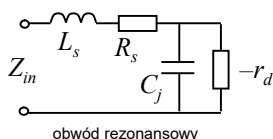
### Parametry

Symbol diody:



$$r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} < 0$$

małosygnałowy schemat zastępczy dla w.c.z.



obwód rezonansowy

### Parametry

#### • charakterystyczne:

- współrzędne punktu wierzchołka ( $I_P$ ,  $U_P$ ),
- współrzędne punktu doliny ( $I_V$ ,  $U_V$ ),
- ujemna rezystancja dynamiczna  $r_d$ ,
- pojemność warstwy zaporowej  $C_j$ ,
- rezystancja szeregową  $R_s$ ,
- indukcyjność szeregową  $L_s$ .

$$\bar{r}_d = \frac{U_V - U_P}{I_V - I_P}$$

#### • dopuszczalne graniczne:

- maksymalny prąd przewodzenia  $I_F$ ,
- maksymalny prąd w kierunku zaporowym  $I_R$ ,
- maksymalna temperatura złącza  $T_j$ .

### Zastosowania – w zależności od parametrów

własnych w schemacie zastępczym oraz wielkości napięcia polaryzacji i obciążenia:

- układy przełączające,
- wzmacniacze mikrofalowe,
- generatory mikrofalowe.

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

9



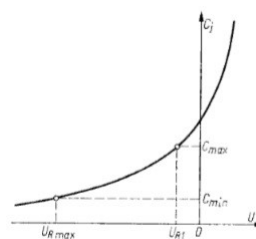
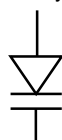
## Diody pojemnościowe



Złącza P-N przeznaczone do zastosowań z wykorzystaniem zjawiska zmiany pojemności warstwy zaporowej złącza przy polaryzacji w kierunku zaporowym:

- **warikapy** (VARIABLE CAPACITANCE) – większe pojemności (10 – 500 pF) – przeznaczone do zastosowania jako zmienne pojemności, np. w układach automatycznego przestrajania obwodów rezonansowych,
- **waraktory** (VARIABLE REACTANCE) – mniejsze pojemności (0,2 – 20 pF) – przeznaczone do zastosowania jako zmienne reaktancyjne, np. we wzmacniaczach i generatorach parametrycznych, czy powielaczach częstotliwości w zakresie wysokich częstotliwości.

Symbol diody:



Charakterystyka  $C_j(U)$  warikapu

Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

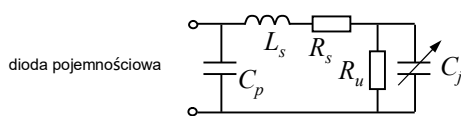
10



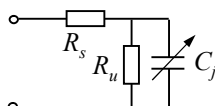
## Diody pojemnościowe



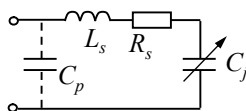
### Schematy zastępcze



**warikap**  
(zakres mniejszych  
częstotliwości)



**waraktor**  
(zakres większych  
częstotliwości)



### Parametry

- charakterystyczne:
  - pojemność złącza  $C_j$ ,
  - rezystancja szeregową  $R_s$ ,
- dopuszczalne graniczne:
  - maksymalne napięcie wsteczne  $U_R$ ,
  - maksymalny prąd w kierunku przewodzenia  $I_F$ ,
  - maksymalna temperatura złącza  $T_j$ ,

### • charakterystyczne:

- $C_{min}(U_{Rmax}), C_{max}(U_{Rmin})$ ,

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi C_j R_u} \quad f_{max} = \frac{1}{2\pi C_j R_s}$$

### • charakterystyczne:

- $C_{min}(U_{Rmax}), C_{max}(U_{R=0})$ ,
- pojemność pasożytnicza oprawki  $C_p$ ,
- indukcyjność szeregową  $L_s$ ,
- częstotliwość maksymalna,

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_j L_s}}$$

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

11



## Rodzaje kontaktów (złączy)



- **Homozłącze** – kontakt dwóch obszarów półprzewodnika tego samego rodzaju (np. Si/Si, Ge/Ge, GaAs/GaAs, AlGaIn/AlGaIn, HgCdTe/HgCdTe, itd.), ale różnie domieszkowanym (o różnym typie przewodnictwa), np. dioda, tranzystor bipolarny, tranzystor JFET.
- **Heterozłącze** – kontakt dwóch obszarów półprzewodnika różnego rodzaju (np. Si/Ge, InAs/GaSb, GaAs/AlGaAs, GaN/AlGaIn, HgCdTe/CdTe, itd.) – o różnej szerokości przerwy energetycznej, np. dioda, tranzystor, laser półprzewodnikowy.
- **Złącze ms** – kontakt metal-półprzewodnik, np. dioda Schotky'ego, złącze omowe.
- **Złącze p-i-n** – złącze pn zawierające dodatkową warstwę półprzewodnika samoistnego.
- **Struktura MIS (MOS)** – układ metal-izolator-półprzewodnik (metal-tlenek-półprzewodnik), np. tranzystor unipolarny z izolowaną bramką.

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

12



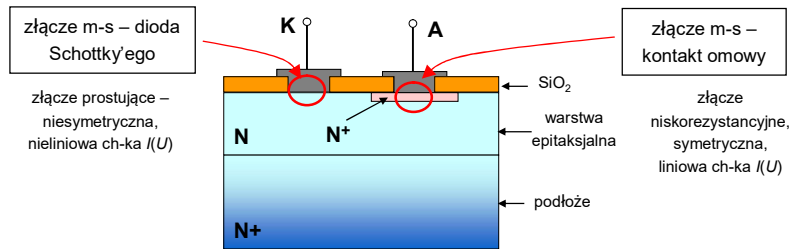
## Złącze metal-półprzewodnik (m-s)



Złącze m-s (w technologii epiplanarnej) – styk warstwy półprzewodnika i metalu

(końcówek elementu)

Kontakt półprzewodnik-metal (doprowadzenie) powinien być niskorezystancyjny i nie powinien wpływać na charakterystykę  $I(U)$  elementu. Jednak w pewnych warunkach może powstać złącze prostujące, ale może też być niskorezystancyjne.



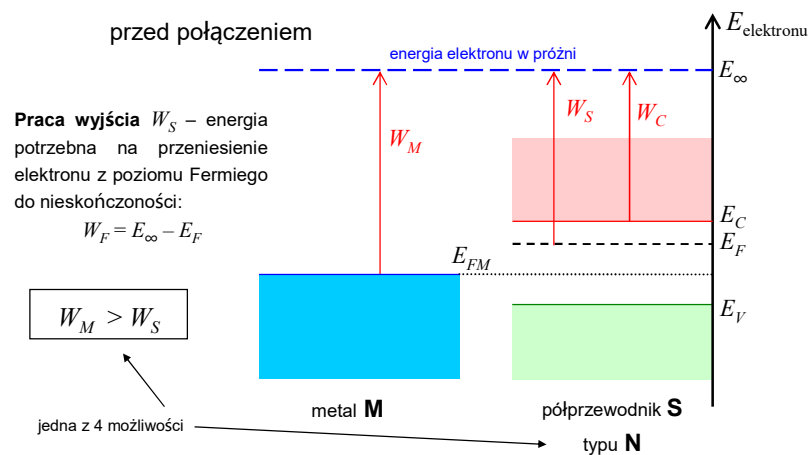
Właściwości złącza m-s wynikają głównie z różnicy prac wyjścia elektronów z metalu i półprzewodnika.



## Złącze m-s



Model złącza m-s – właściwości złącza m-s zależą od prac wyjścia elektronów z metalu i półprzewodnika oraz od rodzaju przewodnictwa półprzewodnika.





## Złącze m-s



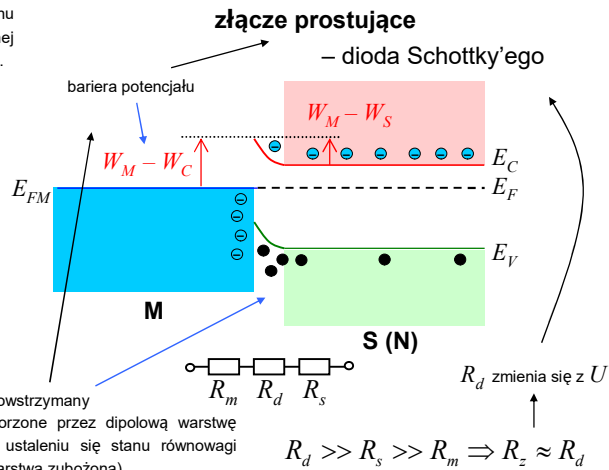
### Energetyczny model pasmowy złącza m-s po połączeniu

Układ m-s dąży do stanu równowagi termodynamicznej – przegrupowanie elektronów.

$$W_M > W_S$$

Więcej elektronów przechodzi z S do M niż przeciwnie.

Dopóki ich ruch nie zostanie powstrzymany przez pole elektryczne wytworzone przez dipolową warstwę ładunku przestrzennego (po ustaleniu się stanu równowagi termodynamicznej powstaje warstwa zubożona).



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

15



## Złącze m-s



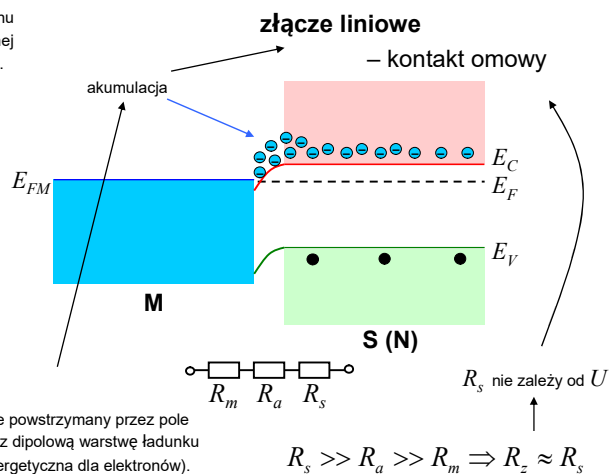
### Energetyczny model pasmowy złącza m-s po połączeniu

Układ m-s dąży do stanu równowagi termodynamicznej – przegrupowanie elektronów.

$$W_M < W_S$$

Więcej elektronów przechodzi z M do S niż przeciwnie.

Dopóki ich ruch nie zostanie powstrzymany przez pole elektryczne wytworzone przez dipolową warstwę ładunku przestrzennego (bariera energetyczna dla elektronów).



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

16



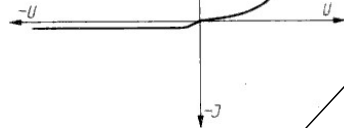
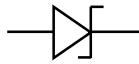


## Złącze m-s



### Złącze prostujące – dioda Schottky'ego

Symbol diody:



$$J = J_{nm} \left[ \exp\left(\frac{U}{\phi_r}\right) - 1 \right]$$

$J_{nm}$  – prąd elektronów przechodzących z metalu do półprzewodnika (prąd emisji termoelektrycznej)

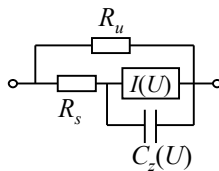
Właściwości:

- mała pojemność (brak pojemności dyfuzyjnej),
- brak magazynowania ładunku w bazie złącza,
- działają na nośnikach większościowych,
- krótkie czasy przełączania,
- niskie napięcie progowe, ok. 0,3 – 0,35 V.

Zastosowania:

- alternatywa dla diod germanowych (małe  $U_0$ ),
- układy impulsowe b.w.c.z. i przełączające,
- prostowniki w zakresie mikrofalowym,
- detekcja sygnałów mikrofalowych,
- układy cyfrowe TTL-LS.

schemat zastępczy złącza



$$C_d = 0 !$$

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

17



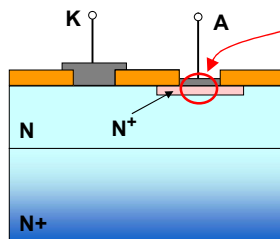
## Złącze m-s



### Złącze liniowe – kontakt omowy

Warunki utworzenia złącza omowego:

- cienka warstwa zaporowa (umożliwiająca tunelowanie elektronów),
- lub
- wyeliminowanie wpływu stanów powierzchniowych (całkowite zapełnienie lub opróżnienie).



kontakt omowy: **m-N<sup>+</sup>-N** lub **m-P<sup>+</sup>-P**

Silne domieszkowanie półprzewodnika i wtopienie metalu (dużo defektów sieci krystalicznej)

→ nieskończenie duża szybkość rekombinacji nośników mniejszościowych ( $\tau \approx 0$ ) i brak bariery dla nośników większościowych

→ liniowa i symetryczna charakterystyka  $I(U)$  i mała rezystancja

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

18



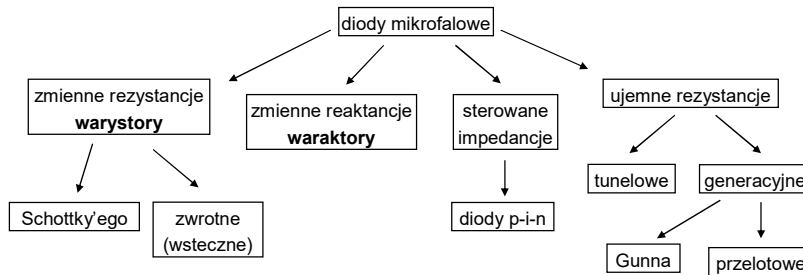
## Diody mikrofalowe



Przeznaczone do zastosowań w zakresie mikrofalowym:  $\lambda < 1 \text{ m}$   
( $f > 300 \text{ MHz}$ )

W praktyce inżynierskiej:  $1 \text{ GHz} < f < 700 \text{ GHz}$  – początek zakresu promieniowania podczerwonego ( $\lambda = 430 \text{ }\mu\text{m}$ )

Podział pod względem funkcjonalnym:



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

19

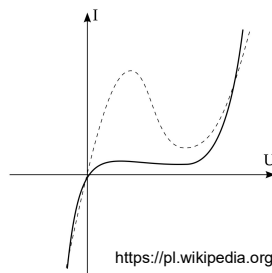


## Dioda wsteczna



Dioda wsteczna (zwrotna) – odwrócenie roli obu kierunków polaryzacji

Konstrukcyjnie diody wsteczne są podobne do diod tunelowych – nie mają charakterystycznego punktu szczytowego na charakterystyce. Wynika to ze słabszego domieszkowania – poziom Fermiego jest na krawędzi pasma zabronionego:



• polaryzacja w kierunku przewodzenia – nie ma prądu Esakiego (mały prąd – „idealny zawór”),

• polaryzacja w kierunku zaporowym – gwałtownie wzrasta prąd Zenera.

Właściwości:

- brak napięcia progowego,
- duża czułość prądowa,
- działają na nośnikach większościowych (duża szybkość działania).

Symbol diody:



Zastosowania: detekcja i mieszanie sygnałów.

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

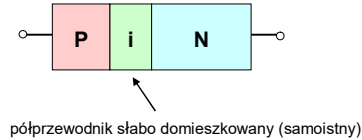
20



## Dioda p-i-n



Dioda o zmiennej impedancji



Dzięki warstwie „i”:

- polaryzacja w kierunku zaporowym – duża rezystancja ( $\sim 10k\Omega$ ) i mała pojemność ( $\sim 1pF$ ) – obszar zubożony praktycznie pokrywa się z warstwą „i” bez względu na wartość napięcia,
- polaryzacja w kierunku przewodzenia – mała rezystancja w kierunku przewodzenia – warstwa „i” jest „zalewana” przez dziury i elektrony z sąsiednich warstw:
  - dla m.cz. nośniki w warstwie „i” zdążą zrekombinować – dioda ma własności prostownicze,
  - dla w.cz. zmiana wartości płynącego prądu powoduje zmianę koncentracji nośników i w efekcie zmianę rezystancji (o kilka rzędów, nawet do  $\sim 0,1\Omega$ ).

Zastosowania: przełączniki, tłumiki o regulowanym tłumieniu, detektory promieniowania, zabezpieczenia przez przesterowaniem wejść urządzeń w.cz., modulatory, dzielniki.

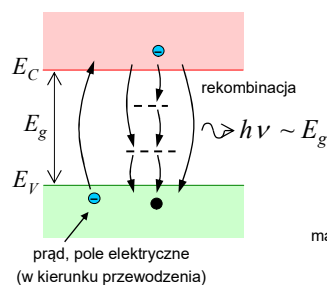


## Dioda LED



Dioda elektroluminescencyjna, LED (ang. light-emitting diode)

**Elektroluminescencja** – zjawisko luminescencji w ciałach stałych i gazach pod wpływem przepływu prądu, pola elektrycznego.



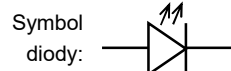
Rekombinacja:

- utrata energii w postaci kwantu promieniowania  $h\nu$ ,
- bezpośrednia lub pośrednia (zależy od rodzaju materiału i domieszek).

Określony rodzaj materiału i domieszek

Stała wartość  $E_g$  i poziomów energetycznych

Mały rozrzut energii (długości fali – barwy)



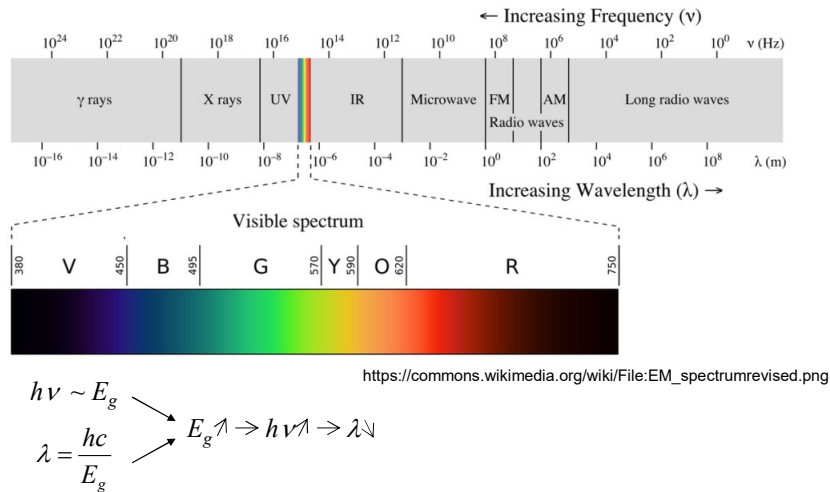
Symbol diody:



## Dioda LED



### Widmo promieniowania



Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

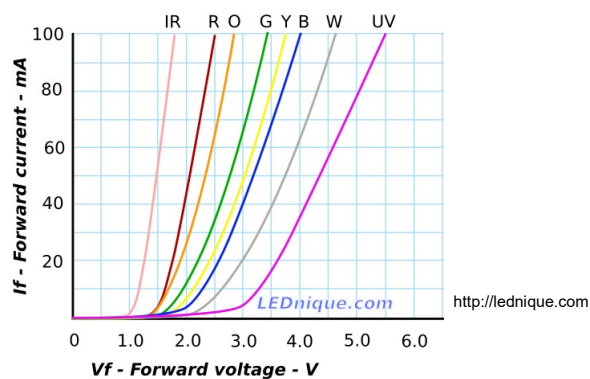
23



## Dioda LED



### Charakterystyki diod



Intensywność świecenia zależy od wartości doprowadzonego prądu (zależność ta jest liniowa w dużym zakresie zmian prądu).

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

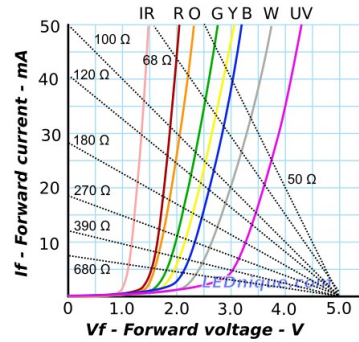
24



## Dioda LED



Dobór rezystora



<http://lednique.com>

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

25



## Dioda LED



Materiały półprzewodnikowe – duża ilość dostępnych materiałów i domieszek – zakres barw pokrywa

praktycznie promieniowanie widzialne.  
The Lumex LED color guide

LED P/N Suffix	Description	Chemistry	# of Elements	Color Temperature (CCT Typ)	Peak Wavelength (λ / x-coord)	Dominant Wavelength (λ / y-coord)	Forward Voltage (Vf Typ) (Vf Max)	Brightness
H	High Efficiency Red	GaP	2	~	700	660	2.0 2.5	Standard
SR	Super Red	GaAlAs	3	~	660	640	1.7 2.2	High
SR	Super Red	AlInGaP	4	~	660	640	2.1 2.5	High
SI	Super High Intensity Red	AlInGaP	4	~	636	628	2.0 2.6	High
I	High Intensity Red	GaAsP	3	~	635	625	2.0 2.5	Standard
ZI	TS AllnGaP Red	AlInGaP	4	~	640	630	2.2 2.8	High
SO	Super Orange	AlInGaP	4	~	610	602	2.0 2.5	Standard
A	Amber	GaAsP	3	~	605	610	2.0 2.5	Standard
SY	Super Yellow	AlInGaP	4	~	590	588	2.0 2.5	Standard
ZY	TS AllnGaP Yellow	AlInGaP	4	~	590	589	2.3 2.8	High
Y	Yellow	GaAsP	3	~	590	588	2.1 2.5	Standard
SUG	Super Ultra Green	AlInGaP	4	~	574	568	2.2 2.6	High
G	Green	GaP	2	~	565	568	2.2 2.6	Standard
SG	Super Green	GaP	2	~	565	568	2.2 2.6	Standard
PG	Pure Green	GaP	2	~	555	555	2.1 2.5	Standard
UPG	Ultra Pure Green	InGaN	3	~	525	520	3.5 4.0	High
UEG	Ultra Emerald Green	InGaN	3	~	500	505	3.5 4.0	High
USB	Ultra Super Blue	InGaN	3	~	470	470	3.5 4.0	High
UV	Ultra Violet	InGaN	3	~	410	~	3.5 4.0	Standard
SUV	Super Violet	InGaN	3	~	380	~	3.4 3.9	Standard
T	Turquoise	InGaN	3	~	0.19	0.41	3.2 4.0	Standard
V	Violet / Purple	InGaN	3	~	0.22	0.11	3.2 4.0	Standard
P	Pink	InGaN	3	~	0.33	0.21	3.2 4.0	Standard
MW (Warm)	Warm White	InGaN	3	3000K	~	~	3.3 4.0	High
NW (Neutral)	Neutral White	InGaN	3	4000K	~	~	3.3 4.0	High
UW (Cool)	Cool White	InGaN	3	6000K	~	~	3.3 4.0	High

<http://lednique.com>

Elementy elektroniczne I – pozostałe rodzaje diod

26