

# Pracownia fizyczna i elektroniczna

## Wykład 2: Dioda półprzewodnikowa

**Kontakt:** [mkuich@fuw.edu.pl](mailto:mkuich@fuw.edu.pl)

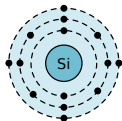
**Materiały:** Pracownia fizyczna i elektroniczna (1100-2F23,1100-2BF21)

- kurs na platformie Kampus

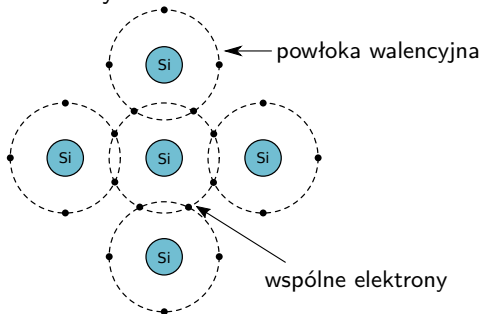
# Struktura materii

- Materia składa się z atomów. Rozważamy materię w postaci **ciała stałego**, które dzielimy na: **kryształy** i ciała bezpostaciowe

Atom krzemenu  
 ${}_{14}\text{Si}$

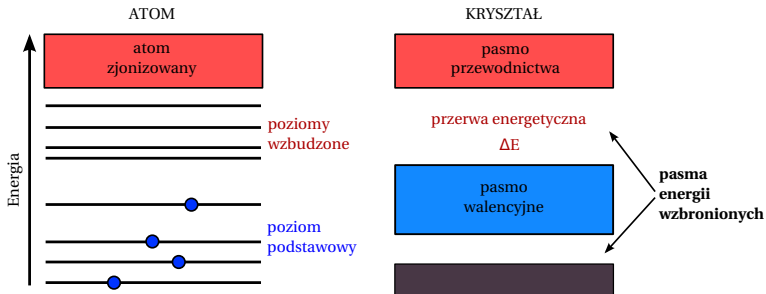


Kryształ krzemenu



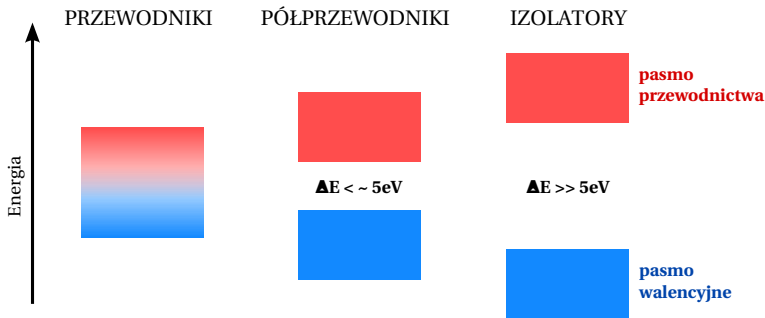
- Rodzaje kryształów (rodzaje wiązań):
  - ▶ kryształy cząsteczkowe (wiązanie van der Waalsa)
  - ▶ kryształy o wiązaniach wodorowych (wiązanie elektrostatyczne)
  - ▶ kryształy jonowe (wiązanie elektrostatyczne)
  - ▶ kryształy atomowe (wiązanie kowalencyjne)
  - ▶ kryształy metaliczne (wiązanie kowalencyjne)

# Pasma energetyczne



- **Pasmo walencyjne** - najwyższe pasmo energetyczne elektronów związanych z jonami sieci krystalicznej
- **Pasmo przewodnictwa** - elektron staje się wspólny dla całego kryształu i może się w nim przemieszczać pod wpływem pola elektrycznego, jako **nośnik prądu** → Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa decyduje o przewodnictwie kryształu
- Pasma energetyczne są oddzielone od siebie pasmem wzbronionym
  - **przerwą energetyczną  $\Delta E$**  → Elektron w atomach nie mogą posiadać takich energii

# Podział materiałów



**Przewodniki** - pasma przewodnictwa i walencyjne częściowo przekrywają się, pasmo przewodnictwa jest częściowo wypełnione

## Półprzewodniki samoistne

- pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa są rozdzielone małą przerwą energetyczną
- elektrony mogą przechodzić z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa po otrzymaniu porcji energii  $\geq \Delta E$
- koncentracja nośników prądu zależy od temperatury, natężenia promieniowania

**Izolatory** - przerwa energetyczna jest na tyle duża, że w normalnych warunkach liczba elektronów zdolnych znaleźć się w paśmie przewodnictwa jest bardzo mała

# Mechanizm przewodnictwa - przewodniki (metale)

Prąd elektryczny - ruch ładunków pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego

**W próżni:**

- ▶ ruch jednostajnie przyspieszony

**W materiałach:**

- ▶ spowalnianie elektronów w wyniku zderzeń z fononami
- ▶ dryf chmury elektronów wzdłuż pola elektrycznego z prędkością  $v$  ( $\sim$  cm/s)

**Fonony** - centra rozpraszania; np. zanieczyszczenia lub oscylacje sieci

**Przewodnictwo materiału:**

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau_e}{2m_e}$$

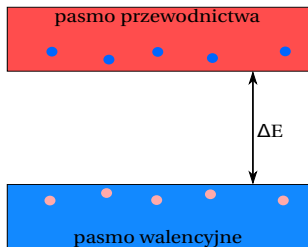
$n_e$  - koncentracja nośników  
 $\tau_e$  - średni czas życia nośników

- ▶ Ze wzrostem temperatury rośnie koncentracja fononów (zwiększają się drgania sieci krystalicznej)

W metalach:

- zwiększenie rozpraszania i zmniejszenie  $\tau_e$
- koncentracja elektronów zmienia się bardzo słabo ( $n_e \approx const$ )
- opór metali zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury

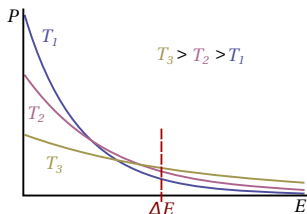
# Mechanizm przewodnictwa - półprzewodniki samoistne



- ▶ elektron w paśmie walencyjnym absorbuje porcję (kwant) energii  $\geq \Delta E$
- ▶ wiązanie w kryształach zostaje zerwane, elektron może przejść do pasma przewodnictwa
- ▶ powstaje **dziura** w paśmie walencyjnym - quasiladunek dodatni, który może się przemieszczać

## Swobodne elektrony (w paśmie przewodnictwa) i dziury (w paśmie walencyjnym) są nośnikami prądu w półprzewodnikach

- ▶ Gęstości nośników obu rodzajów pozostaje w równowadze dynamicznej
- ▶ Para nośników elektron-dziura rekombinuje średnio po czasie  $10^{-5} - 10^{-7}$  s
- ▶ Rozkład energii nośników można opisać rozkładem Boltzmana:  $n_e(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$
- ▶ Ze wzrostem temperatury rośnie koncentracja nośników prądu  $\rightarrow$  przewodność półprzewodników zwiększa się



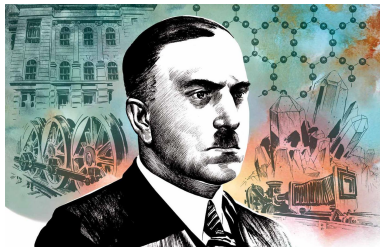
stała Boltzmana:  $k_B = 8.62 \times 10^{-5}$  eV/K  
temperatura:  $T$  [K]

# Przykłady półprzewodników samoistnych

Pierwiastek	$\Delta E$
Półprzewodniki elementarne	
Si	1.12 eV
Ge	0.661 eV
C (diament)	5.46 eV
amorficzny Si	1.71 eV
Popularne związki półprzewodnikowe	
GaAs	1.41 eV
GaP	2.26 eV
GaSb	0.661 eV
InAs	0.354 eV
InP	1.344 eV
InSb	0.17 eV
GaN	3.4 eV
InN	1.89 eV
AlN	6.2 eV
SiC	2.2-3.2 eV

Polski prekursor rozwoju elektroniki

Jan Czochralski

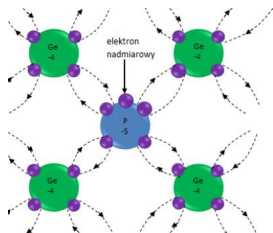


kryształy otrzymane metodą Czochralskiego



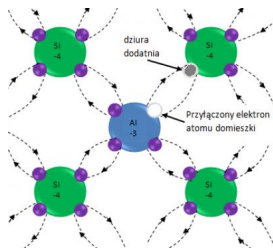
# Półprzewodniki domieszkowane

Poprzez odpowiednie domieszkowanie można wytwarzać półprzewodniki o kontrolowanej, nadmiarowej koncentracji nośników prądu (elektronów lub dziur)



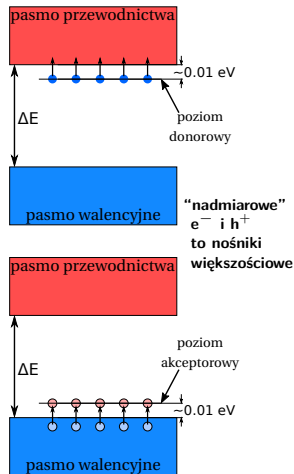
Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych **domieszki pięciowartościowej (donora)** powoduje wytworzenie elektronu słabo związanego z siecią → **półprzewodnik typu "N"**

Donory: P, As, Sb



Wtrącenie do sieci krystalicznej zbudowanej z atomów czterowartościowych **domieszki trójwartościowej (akceptora)** powoduje wytworzenie dziury słabo związanej z siecią → **półprzewodnik typu "P"**

Akceptory: Al, Ga, In, B

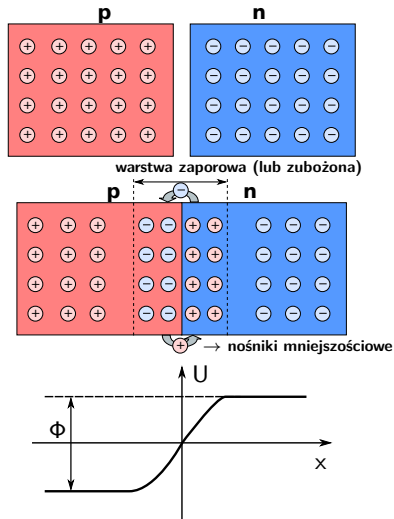


W temperaturze pokojowej prawie wszystkie domieszki są zjonizowane



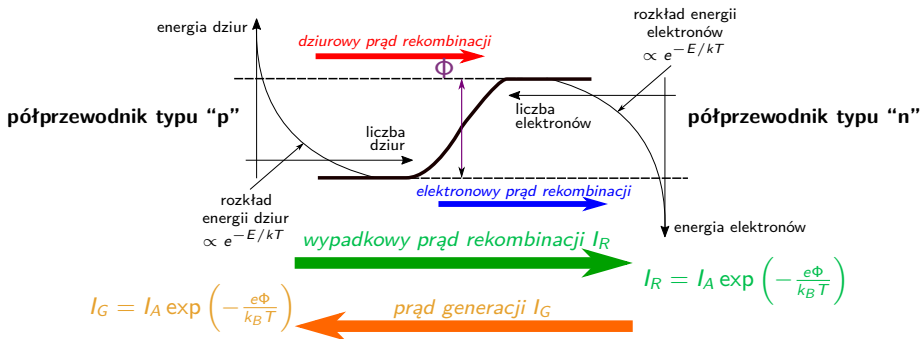
# Złącze p-n - dioda półprzewodnikowa

- Złącze p-n powstaje przez "zetknięcie"<sup>1</sup> półprzewodników o różnych rodzajach przewodności niesamoistnej
- Granica zetknięcia półprzewodnika typu p z półprzewodnikiem typu n nosi nazwę złącza p-n
- Różnica koncentracji nośników po obu stronach złącza powoduje dyfuzję nośników ładunków: w obszarze złącza p-n elektrony przechodzą z półprzewodnika typu n do p, natomiast dziury w kierunku przeciwnym.
- W ten sposób powstaje warstwa podwójna ładunku - kryształ typu p naładował się ujemnie, a kryształ typu n naładował się dodatnio → na styku obu materiałów powstaje próg potencjału o wysokości  $\Phi$
- Próg potencjału ogranicza dyfuzję nośników i prowadzi do stabilizacji sytuacji w złączu → nośniki osiągają równowagę dynamiczną



<sup>1</sup>W rzeczywistości złącza p-n nie da się wytworzyć przez proste zetknięcie dwóch kryształów, technologia wykonywania złącza jest znacznie bardziej skomplikowana.

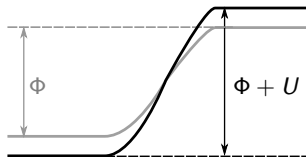
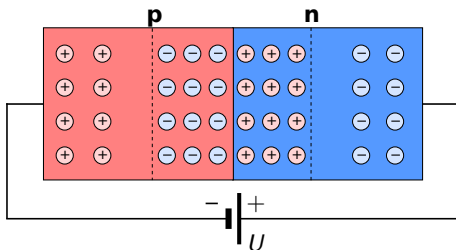
# Niespolaryzowane złącze p-n



- Ruch nośników jest odpowiedzialny za dziurowy i elektronowy prąd rekombinacji, składające się na wypadkowy prąd rekombinacji  $I_R$
- Prąd rekombinacji jest proporcjonalny do liczby nośników zdolnych pokonać próg potencjału  $\Phi$ :  $I_R \propto \int_{e\Phi}^{\infty} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) dE$
- W złączu niespolaryzowanym całkowity prąd płynący przez złącze jest równy zero, gdyż prąd  $I_R$  jest równoważony przez prąd generacji  $I_G$

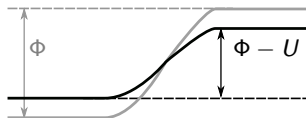
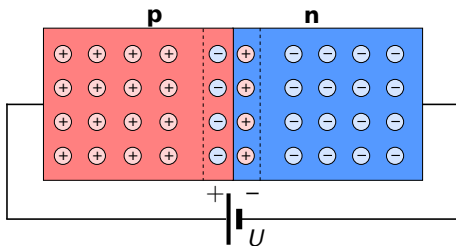
$$I_R = I_G$$

# Złącze p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym



- ▶ Wysokość progu potencjału  $\Phi$  wzrasta o wartość przyłożonego napięcia  $U$
- ▶ Zmniejsza się liczba nośników zdolnych pokonać wyższy próg potencjału  $\Phi + U$
- ▶ Prąd rekombinacji maleje

# Złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia



- ▶ Wysokość progu potencjału  $\Phi$  zmniejsza się o wartość  $U$
- ▶ Rośnie liczba nośników, zdolnych pokonać niższy próg potencjału  $\Phi - U$
- ▶ Prąd płynący przez złącze wzrasta

# Prąd w spolaryzowanym złączu p-n

- Prąd płynący przez złącze jest sumą prądu rekombinacji i generacji:

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_G$$

- Prąd rekombinacji w spolaryzowanym złączu p-n:

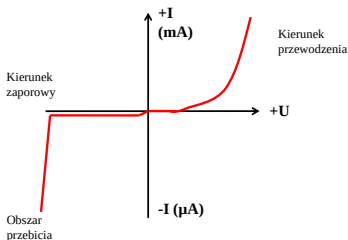
$$I_R = I_A \exp\left(-\frac{e(\Phi - U)}{k_B T}\right) \Rightarrow I_R = I_G \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right)$$

- Równanie opisujące prąd płynący przez złącze p-n - **równanie Shockley'a**:

$$I = I_G \left( \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

# Dioda

- Dioda jest dwuzaciskowym, pasywnym, nieliniowym komponentem elektronicznym i może być traktowana jako dobre przybliżenie elementu przewodzącego prąd tylko w jednym kierunku
- W kierunku przewodzenia obserwujemy spadek napięcia jest wynikiem działania obszaru zubożenia
- Napięcie w kierunku przewodzenia, dla którego **prąd diody osiąga umownie dużą wartość** nazywamy **napięciem przewodzenia złącza** ( $U_p$ )
- W kierunku zaporowym płynie niewielki prąd wsteczny (często pomijany w charakterystykach prądowo-napięciowych diod)
- Dla pewnego charakterystycznego napięcia przyłożonego w polaryzacji zaporowej (napięcia przebicia), następuje raptowny wzrost prądu płynącego przez złącze (tzw. przebicie złącza)
- Zjawiska przebicia nie jest równoważne ze zniszczeniem złącza - dopiero zbyt duży prąd wsteczny, powodując nadmierne wydzielanie ciepła, może zniszczyć złącze

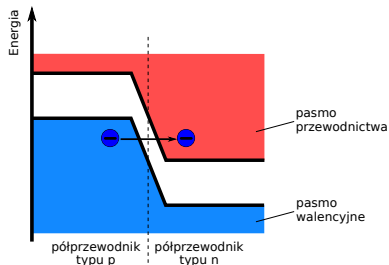


- **przebiecie Zenera**
- **przebiecie lawinowe**

# Przebiecia

## ● Przebiecie Zenera

- występuje w silnie domieszkowanym złączu p-n, gdy napięcie polaryzacji wstecznej takiego złącza jest większe od napięcia Zenera
- górna krawędź pasma walencyjnego obszaru typu-p znajduje się wyżej niż dolna krawędź pasma przewodzenia obszaru typu-n
- elektron, bez zmiany energii, przechodzi z pasma walencyjnego półprzewodnika typu-p do pasma przewodzenia półprzewodnika typu-n → przejście tunelowe
- pojawienie się nośników w pasmie przewodzenia powoduje przepływ prądu w kierunku zaporowym.



## ● Przebiecie lawinowe

- występuje, gdy napięcie polaryzacji wstecznej jest odpowiednio duże, a nośniki przechodzące przez obszar zubożony posiadają dużą energię
- elektrony, zderzając się z węzłami sieci krystalicznej, przekazują im część swojej energii i powodują generację wtórnych par elektron-dziura
- nowopowstałe nośniki w silnym polu elektrycznym zyskują dużą energię i proces powstawania wtórnych nośników się powtarza → efekt lawinowy
- pojawienie się lawiny nośników ładunku elektrycznego w pasmie przewodzenia powoduje szybki wzrost wartości przepływu prądu w kierunku zaporowym.

# Dioda półprzewodnikowa (prostownicza)

- Dla większych prądów równanie Shockley'a modyfikuje się do postaci:

$$U = \frac{Mk_B T}{e} \ln \left( \frac{I}{I_G} + 1 \right) + Ir$$

gdzie:

$r$  - rezystancja (pasożytnicza) materiału diody

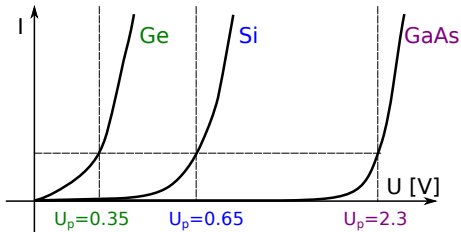
$M$  - współczynnik związany z typem półprzewodnika

- W ćwiczeniu nr 3 - dioda półprzewodnikowa należy zbadać charakterystyki prądowo napięciowe różnych diod:

→ charakterystyki opisać równaniem Shockley'a z uwzględnieniem parametru  $M$ :

$$I_D(U_D) = I_G \left( \exp \left( \frac{eU_D}{Mk_B T} \right) - 1 \right)$$

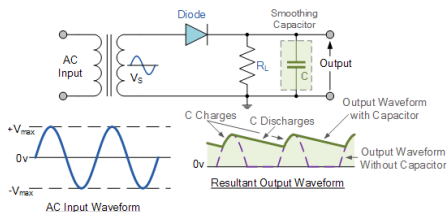
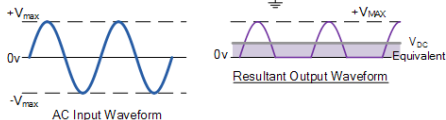
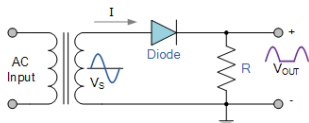
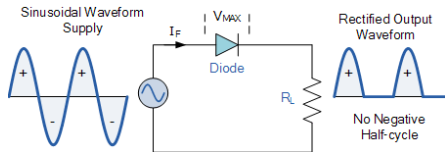
→ wyznaczyć  $U_p$  dla każdej diody





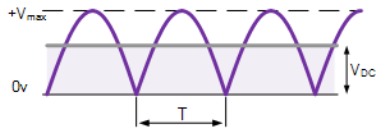
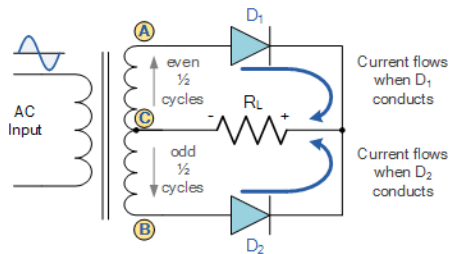
# Prostownik jednopółkowy

- Podstawowym zastosowaniem diod jest "prostowanie", czyli zamiana napięcia przemiennego na jednokierunkowe
- W prostowniku jednopółkowym napięcie wyjściowe występuje jedynie przez połowę okresu wejściowej fali sinusoidalnej



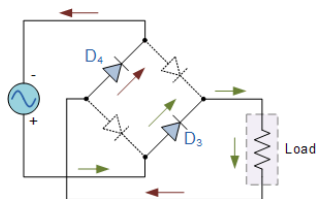
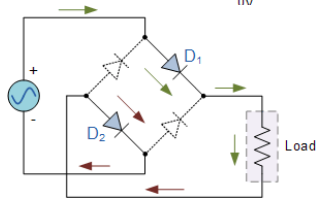
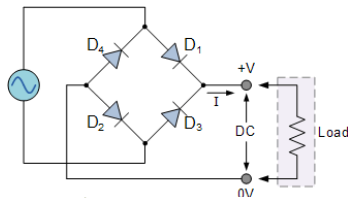
# Prostownik dwupołówkowy

- W prostowniku dwupołówkowym napięcie wyjściowe w tym układzie wykorzystuje obie połówki okresu sygnału wejściowego

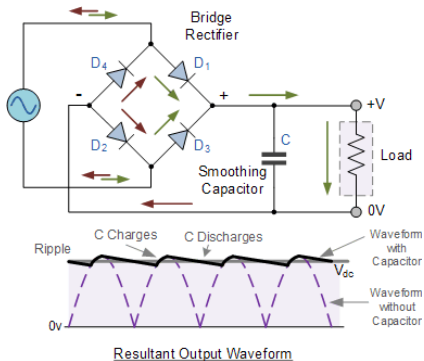


Resultant Output Waveform

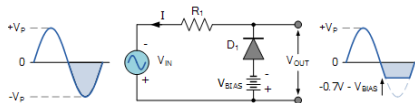
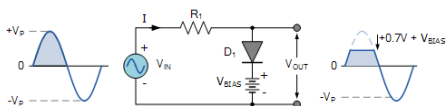
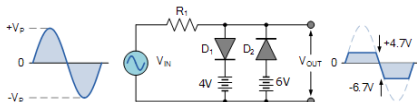
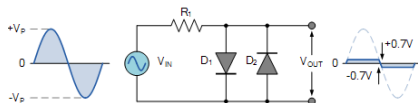
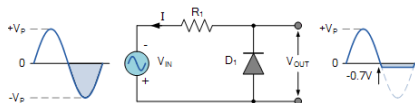
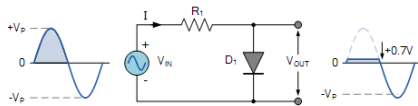
# Przemiennik mostkowy



- W układzie mostkowym zawsze szeregowo przewodzą dwie diody, a napięcie wyjściowe w tym układzie wykorzystuje obie połówki okresu sygnału wejściowego

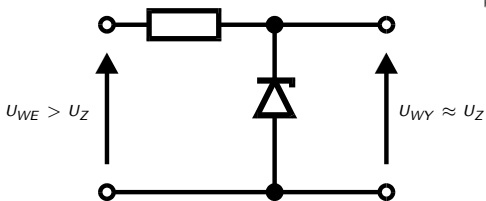


# Diodowe ograniczniki napięcia

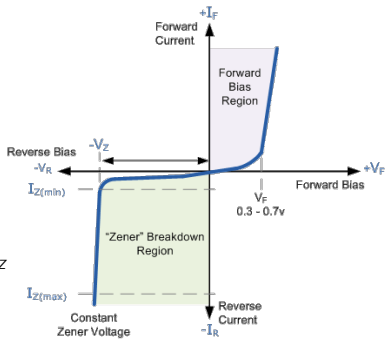


# Dioda Zenera i jej zastosowanie

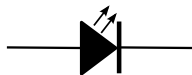
- Dopuszczalne napięcie zaporowe diody Zenera jest ograniczone przez **napięcie Zenera ( $U_Z$ )**
- Diody Zenera stosuje się do budowy prostych stabilizatorów napięcia oraz układów napięcia odniesienia dla przypadku stabilizatorów napięcia



Stabilizator napięcia na diodzie Zenera



# Diody elektroluminescencyjne (LED)



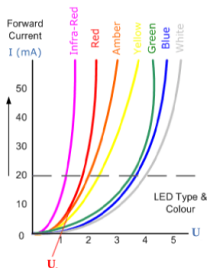
- Emitują promieniowanie widzialne lub podczerwone w wyniku rekombinacji swobodnych nośników dziur i elektronów w spolaryzowanym złączu p-n
- Emitowane jest wówczas światło o długości fali

$$\lambda = \frac{c h}{w_g}$$

gdzie:  $c$  - prędkość światła,  $h$  - stała Plancka,  $w_g$  - szerokość pasma zabronionego

- Barwa światła emitowanego przez diodę zależy od rodzaju materiału półprzewodnikowego użytego do jej budowy oraz technologii wykonania

Typowe charakterystyki LED			
Rodzaj półprzewodnika	Długość fali światła	Kolor	V. @ 20mA
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v



# Fotodioda



- Fotodioda to złącze p-n (lub p-i-n), które zużywa energię świetlną do wytworzenia prądu elektrycznego
- Fotony padające na złącze są absorbowane (zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne) w rezultacie czego elektron zostaje przeniesiony do pasma przewodnictwa i powstaje para elektron-dziura
- Prąd przewodzenia złącza p-n zwiększa się wraz ze wzrostem strumienia świetlnego
- Złącze p-n w fotodiodzie polaryzujemy zaporowo z zewnętrznego źródła napięcia
- Fotodiody najczęściej są wykorzystywane jako sensory światła (fotonów)