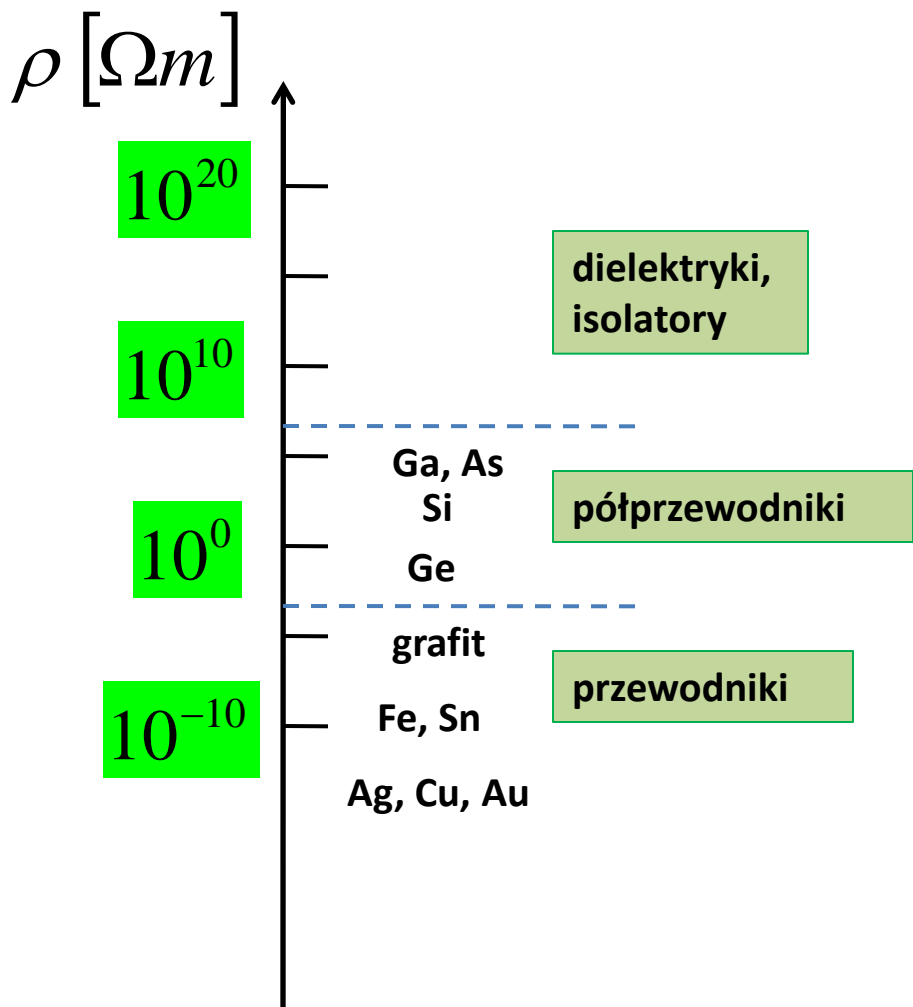
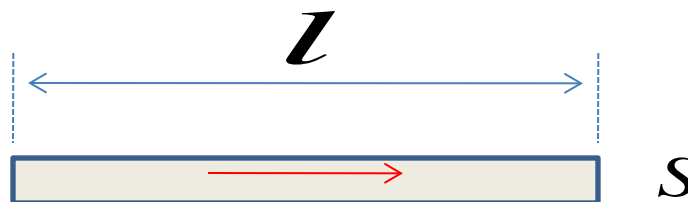


Elementy nieliniowe



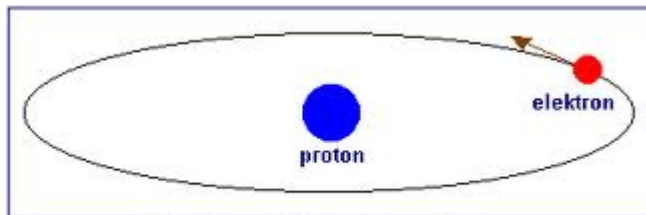
Nieliniowość tych elementów jest związana z fizyką transportu nośników ładunku w tych elementach



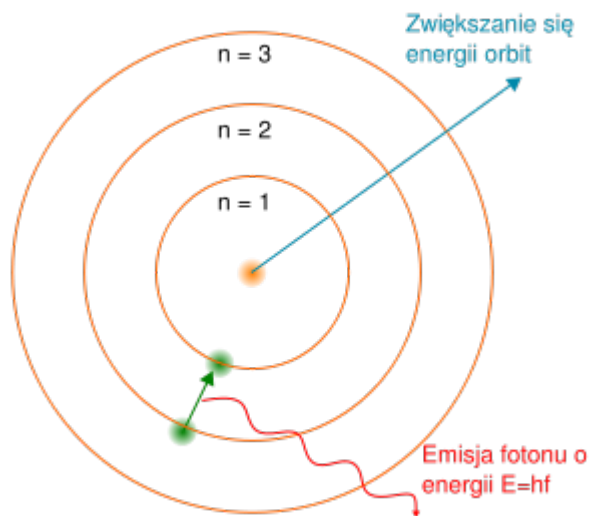
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ – opór właściwy

Mechanika kwantowa



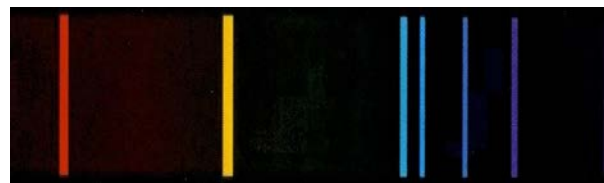
Poglądowy obraz atomu wodoru



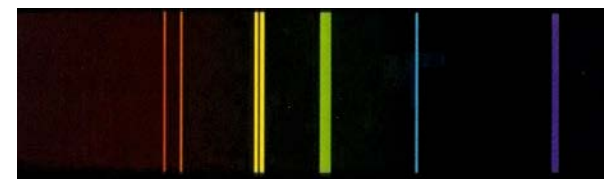
wodór



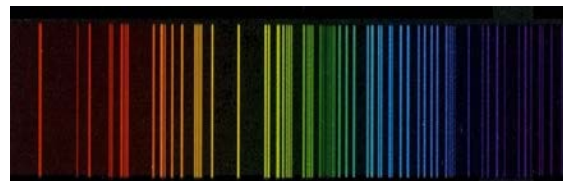
hel



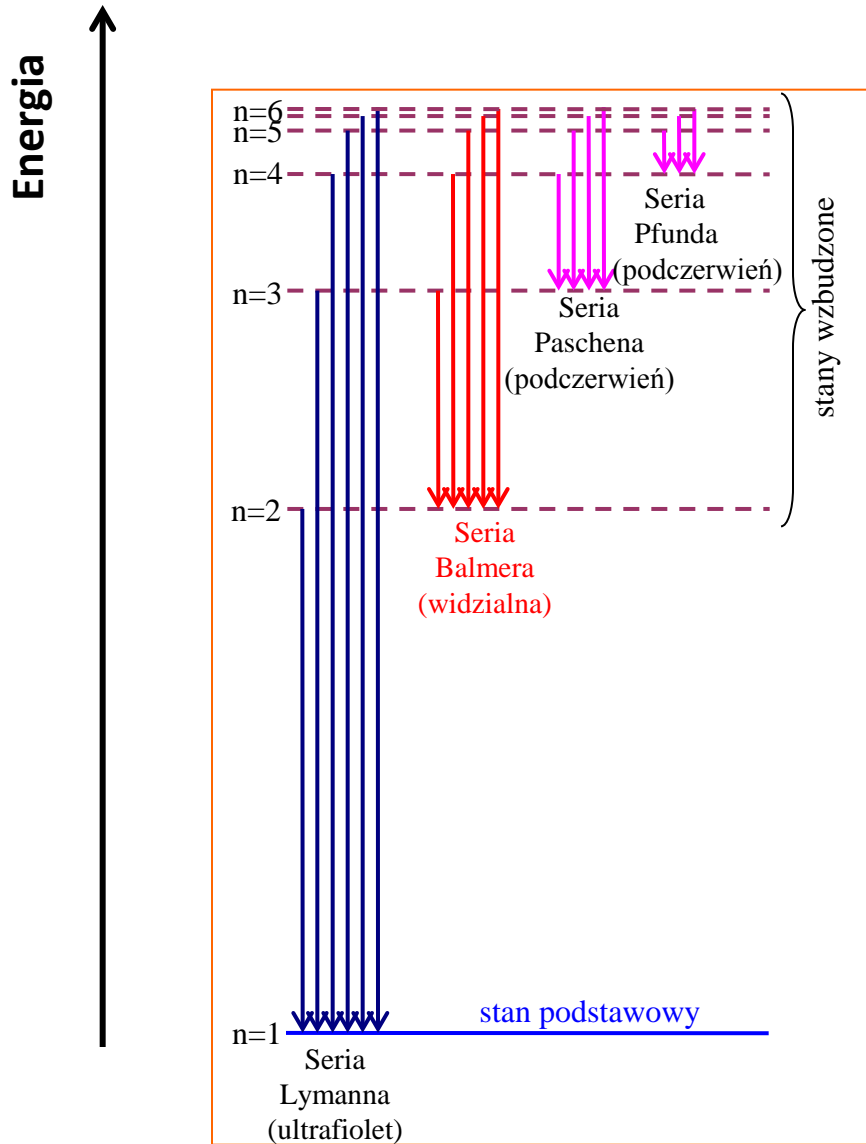
rtęć



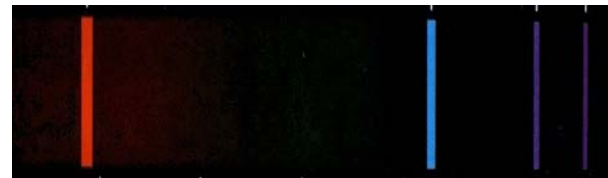
uran



Mechanika kwantowa



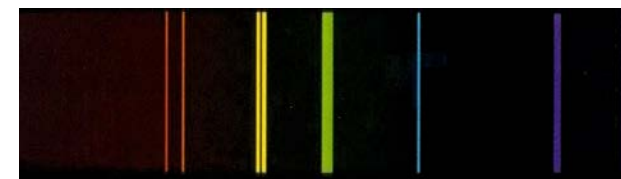
wodór



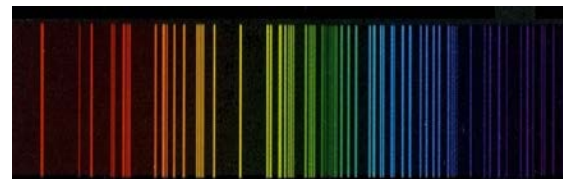
hel



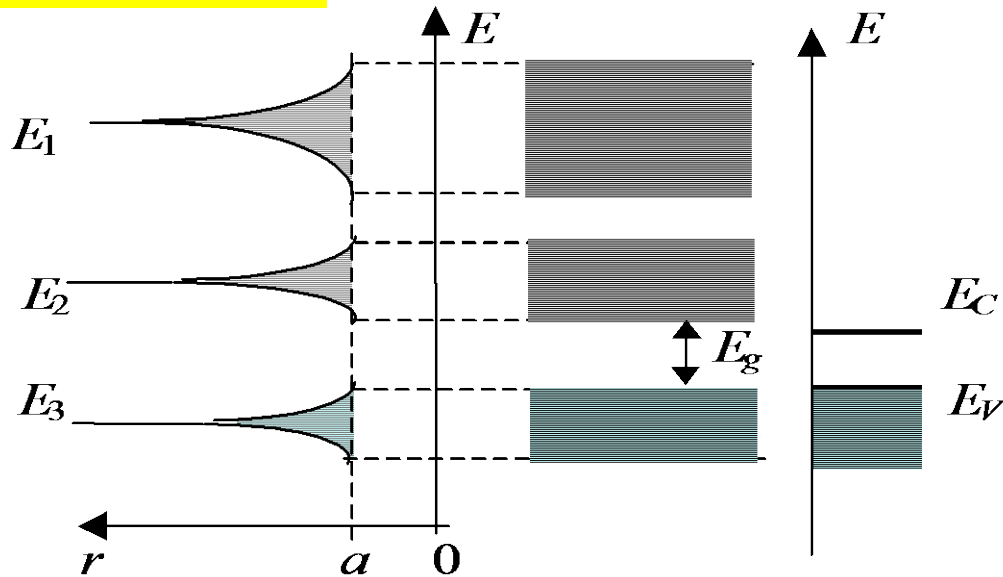
rtęć



uran



Mechanika kwantowa



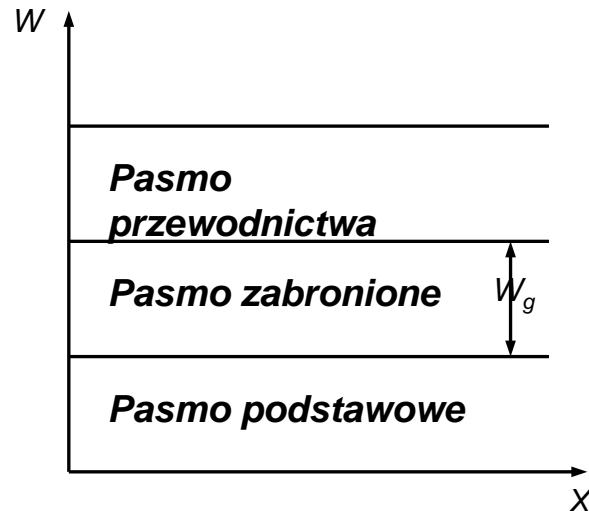
Tworzenie się pasm energetycznych po zbliżeniu jonów na odległość stałej sieci a oraz położenie poziomu E_C (zwykle pustego w półprzewodnikach w $T=0$ K) i poziomu E_V wypełnionego elektronami w $T=0$ K

W półprzewodnikach (i dielektrykach) istnieje pomiędzy pasmem walencyjnym o największej energii E_V a pasmem przewodnictwa o najmniejszej energii E_C zakres energii wzbronionej dla elektronów walencyjnych – *przerwa energetyczna*

$$E_g = E_C - E_V$$

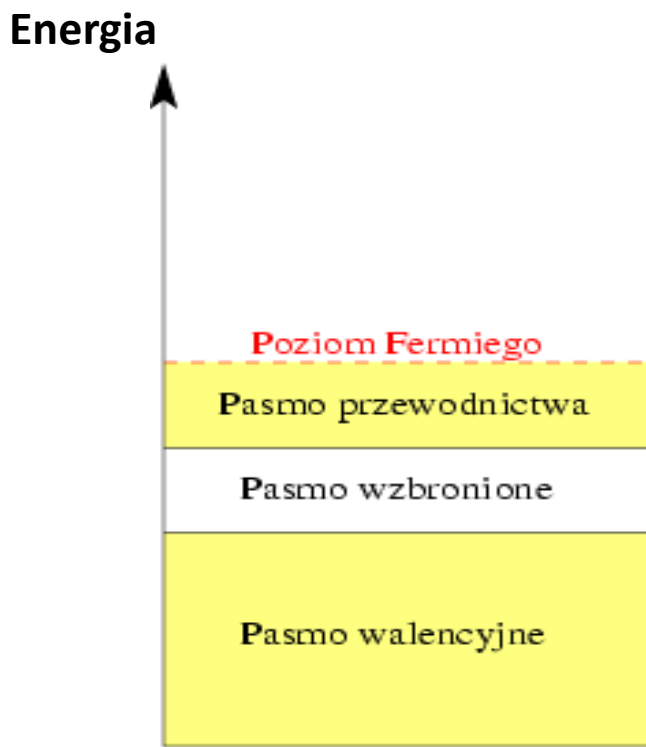
MODEL PASMOWY

Teoria pasmowa – jest to teoria kwantowa opisująca stany energetyczne elektronów w kryształach. W odróżnieniu od atomów, w których dozwolone stany energetyczne elektronów stanowią zbiór poziomów dyskretnych, dozwolone elektronowe stany energetyczne w kryształach mają charakter pasm o szerokości kilku elektronowoltów.



Przewodnik

Poziom Fermiego - maksymalny poziom energetyczny elektronów w atomie, znajdującym się w temperaturze zera bezwzględnego. Istnienie tego poziomu jest konsekwencją zakazu Pauliego a ten konsekwencją tego, iż elektrony są fermionami.

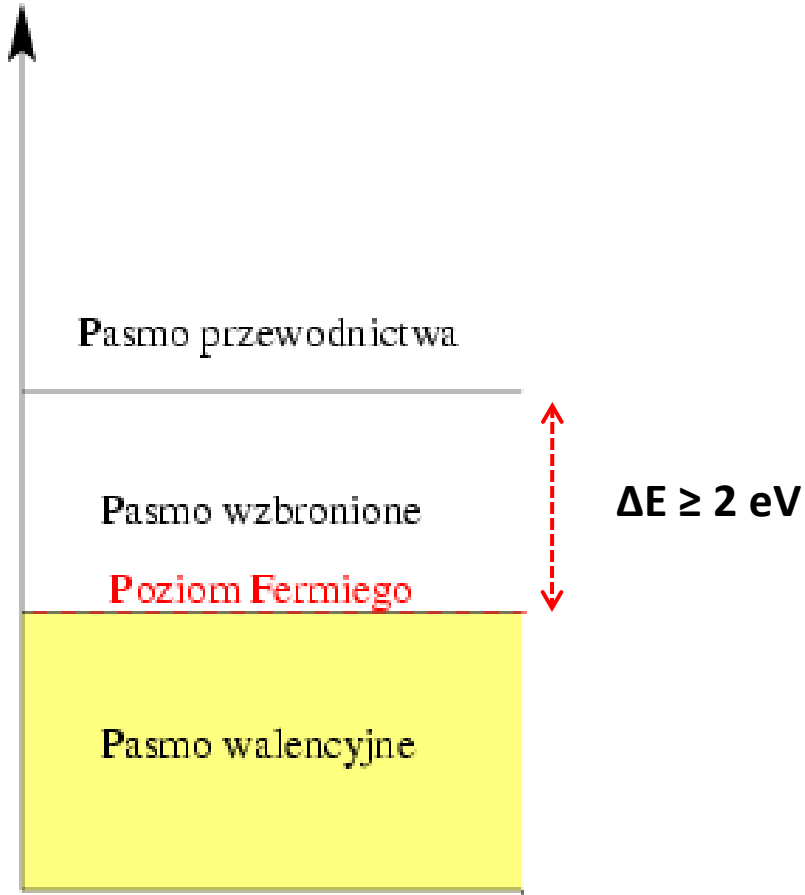


Elektronika posługuje się uproszczonym modelem energetycznym kryształów, w którym opisuje się energię elektronów związanych w atomach dwoma **pasмами** **dozwolonymi**:

- 1. pasmo walencyjne** - zakres energii jaką posiadają elektrony najściślej związane z jądrem atomu;
- 2. pasmo przewodnictwa** - zakres energii jaką posiadają elektrony uwolnione z atomu, będące wówczas nośnikami swobodnymi w ciele stałym.

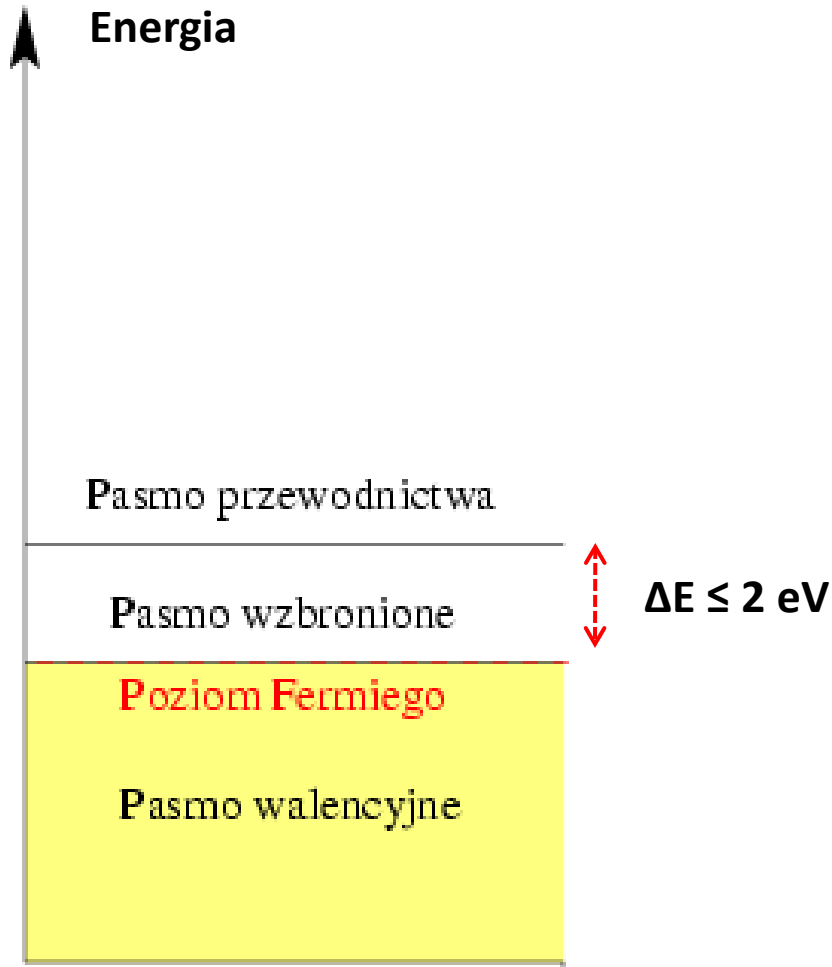
Izolator

Energia



Poziom Fermiego w izolatorach znajduje się w okolicy granicy pasma walencyjnego, a pasmo wzbronione jest szerokie.

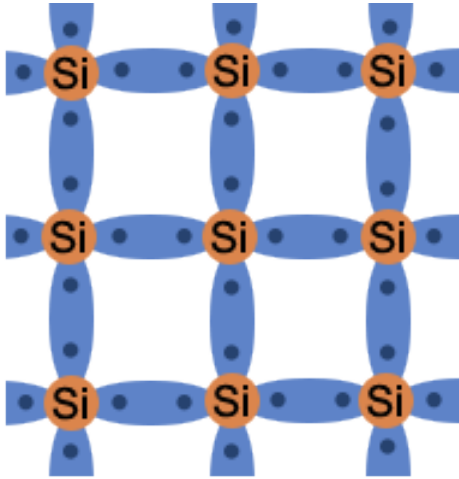
Półprzewodniki spontaniczne



W półprzewodniku poziom Fermiego położony jest podobnie jak w przypadku izolatorów, jednak przerwa energetyczna (szerokość pasma wzbronionego) jest niewielka.

W półprzewodnikach spontanicznych część elektronów przechodzi do pasma przewodnictwa dzięki energii termicznej, lub np. wzbudzeń fotonowych. Przewodnictwo w półprzewodnikach spontanicznych ma charakter pół na pół elektronowo-dziurowy.

Półprzewodniki spontaniczne

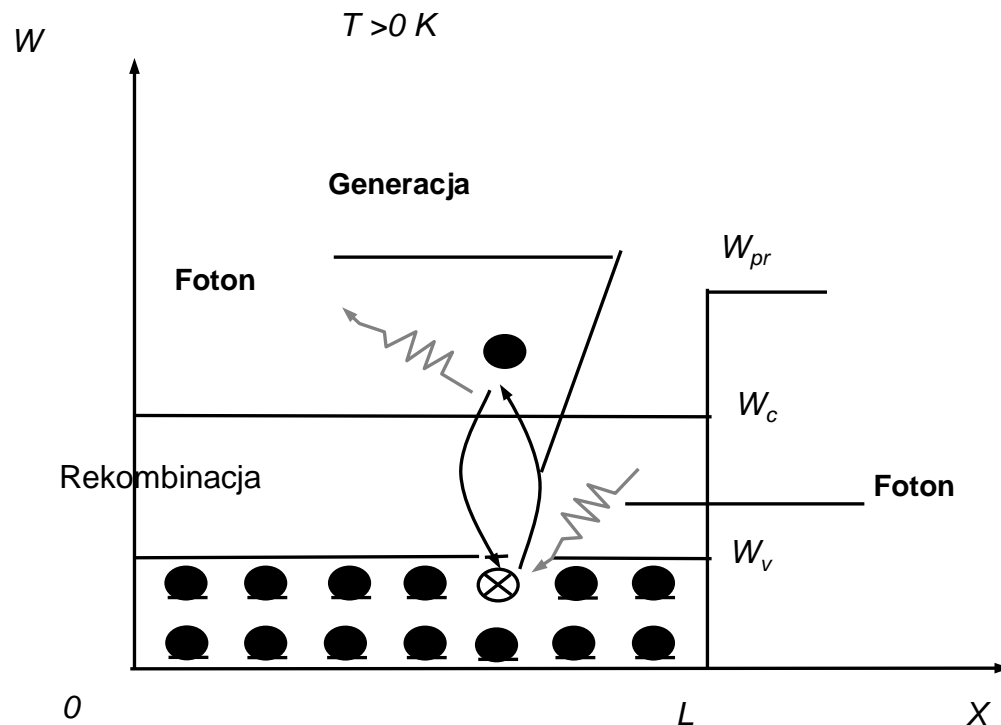


Proces pojawiania się elektronów w paśmie przewodnictwa i wolnych miejsc (dziur) w paśmie podstawowym pod wpływem wzrostu temperatury nosi nazwę **generacji termicznej par dziur-elektron**.

Liczba generowanych par, czyli ich koncentracja, jest tym większa, im jest węższe pasmo zabronione danego półprzewodnika oraz im temperatura monokryształu jest wyższa. Po pewnym czasie pobudzony elektron powraca do stanu podstawowego z wyemitowaniem kwantu promieniowania. Taki proces nazywamy **rekombinacją**

Generacja par elektron-dziura

Przyjmuje się, że w temperaturze 0 kelwinów w paśmie przewodnictwa nie ma elektronów, natomiast w $T > 0$ K ma miejsce generacja par elektron-dziura; im wyższa temperatura, tym więcej takich par powstaje.



Stan równowagi

- W ustalonej temperaturze koncentracja wolnych elektronów i dziur jest jednakowa

$$n=p=BT^3 e^{-\frac{E_G}{kT}}$$

$B=5.4 \cdot 10^{31}$ - dla krzemu

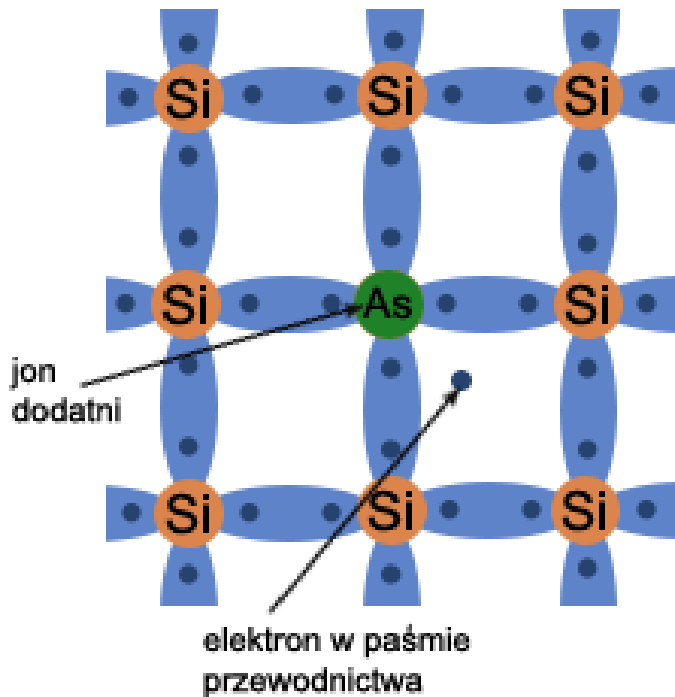
$E_G = 1.12 \text{ eV}$ – szerokość pasma zabronionego

W temperaturze pokojowej mamy $1.5 \cdot 10^{10}$ nośników/cm³

Kryształ Si ma $5 \cdot 10^{22}$ atomów/cm³

Tylko mała część atomów krzemu jest zjonizowana

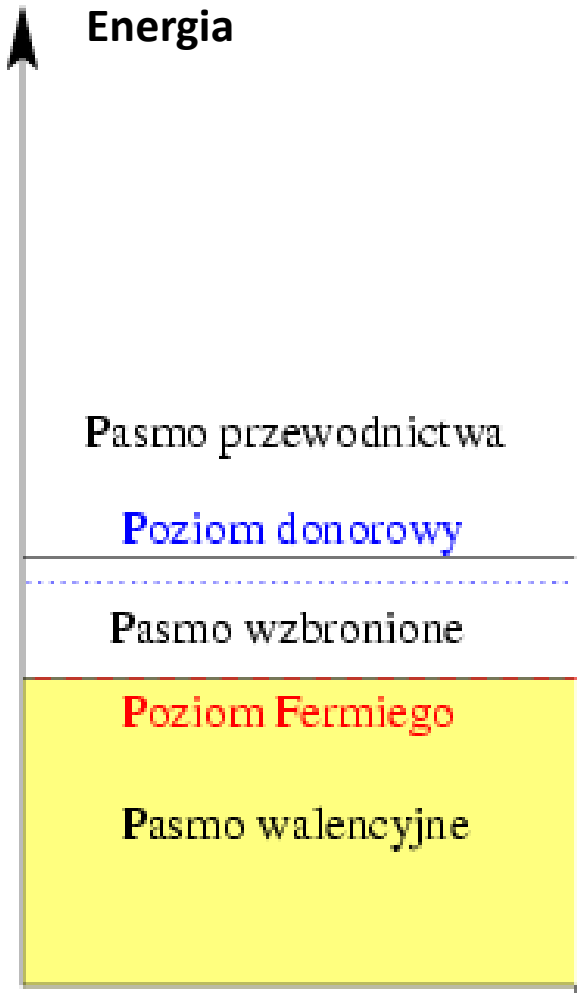
Półprzewodniki typu n



PÓŁPRZEWODNIK TYPU N

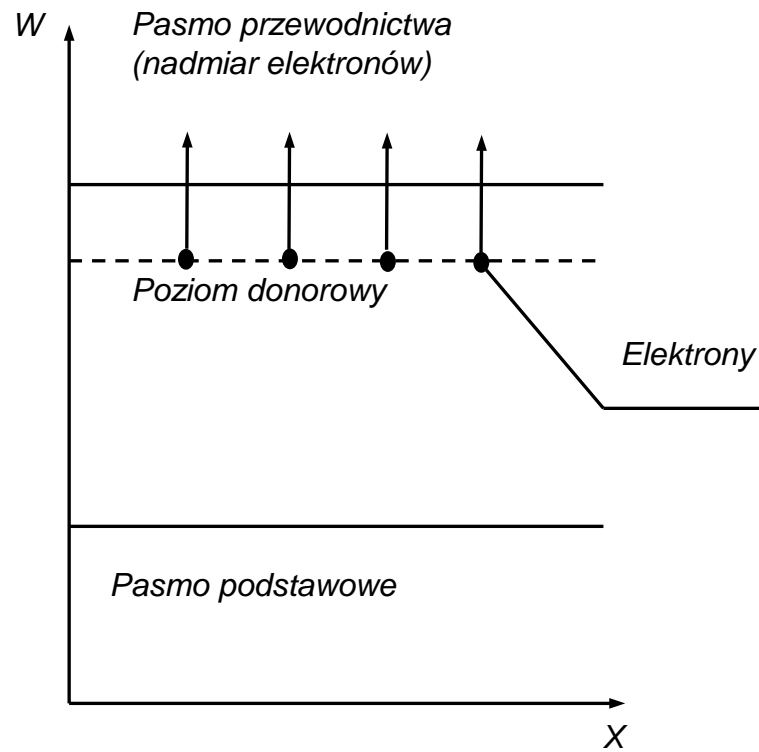
uzyskuje się przez dodanie - w procesie wzrostu kryształu krzemu - domieszki pierwiastka pięciowartościowego (np. antymon, fosfor). Niektóre atomy krzemu zostaną zastąpione w sieci krystalicznej atomami domieszki, zwanymi donorami

Półprzewodniki typu n

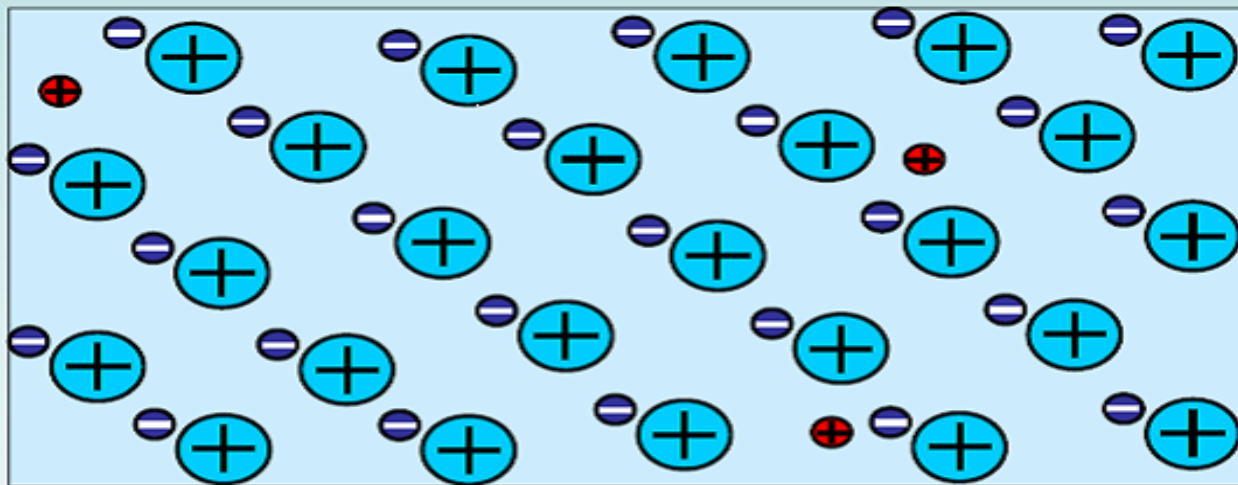


Jeżeli do półprzewodnika (będącego pierwiastkiem grupy 4A) wprowadzimy pierwiastek z grupy 5A nadmiarowe elektrony w strukturze krystalicznej utworzą nowy poziom - poziom donorowy, który znajduje się tuż poniżej pasma przewodnictwa. Elektrony z poziomu donorowego niewielkim kosztem energetycznym mogą przenosić się do pasma przewodnictwa. W półprzewodnikach typu n główny wkład do przewodnictwa pochodzi od elektronów.

Półprzewodniki typu n



Półprzewodnik typu n



Jak wyznaczamy koncentracje nośników?

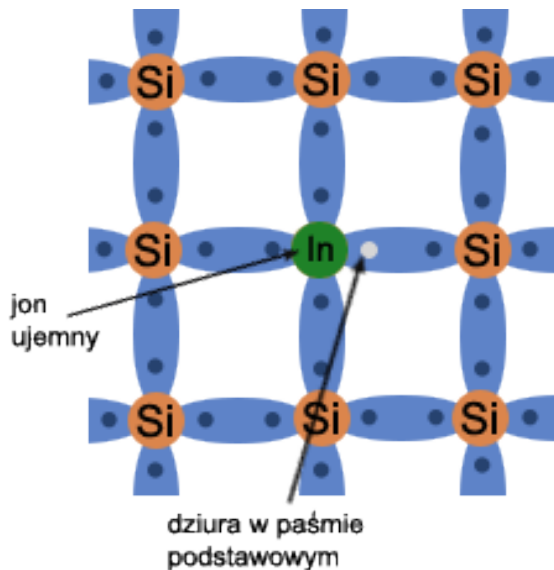
$$N_D = N_D^+ \approx n_{n0} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i (\text{Si}, T = 300 \text{ K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

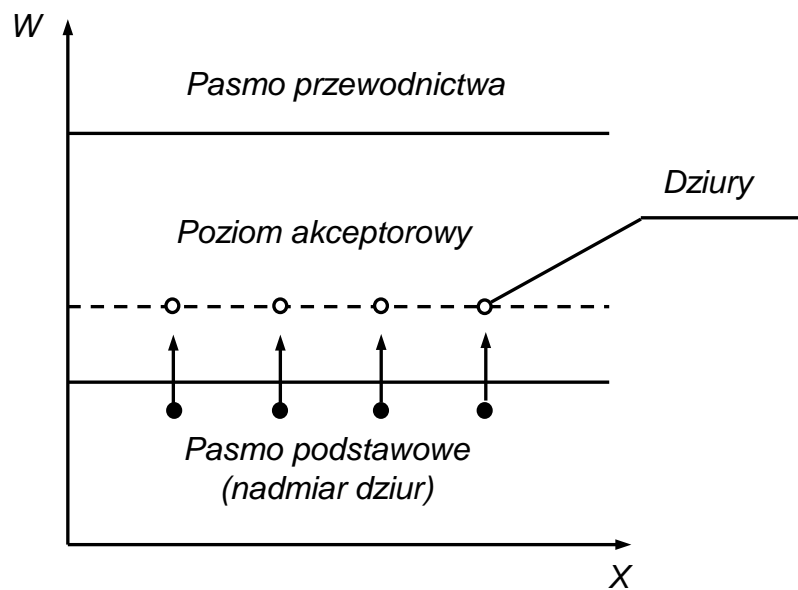
$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} \approx \frac{n_i^2}{N_D} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Półprzewodniki typu p

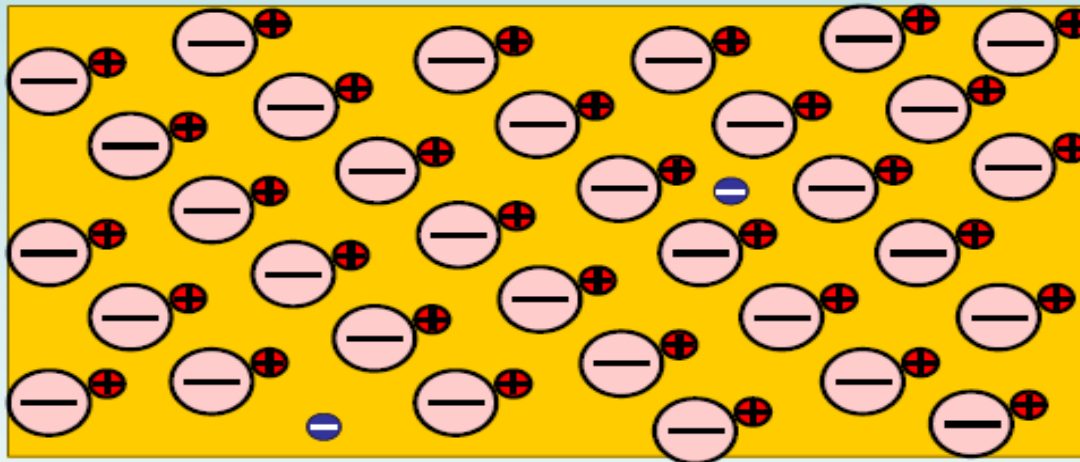


Półprzewodnik typu p uzyskuje się przez zastąpienie niektórych atomów krzemu atomami pierwiastków trójwartościowych (np. glinu, galu). Atom tej domieszki ma trzy elektrony walencyjne, związane z sąsiednimi atomami krzemu. Do wypełnienia czwartego wiązania sąsiadującego krzemu, brakuje w sieci krystalicznej jednego elektronu i zostaje on uzupełniony przez pobranie elektronu z jednego z sąsiednich wiązań, w którym powstaje dziura. Atom pierwiastka trójwartościowego, zwanego **akceptorem**, po uzupełnieniu elektronu w "nieprawidłowym" wiązaniu staje się jodem ujemnym, wywołując lokalną polaryzację kryształu.

Półprzewodniki typu p



Półprzewodnik typu p



Jak wyznaczamy koncentracje nośników?

$$N_A = N_A^+ \approx p_{p0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

$$n_i (\text{Si}, T = 300\text{K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} \approx \frac{n_i^2}{N_A} = 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

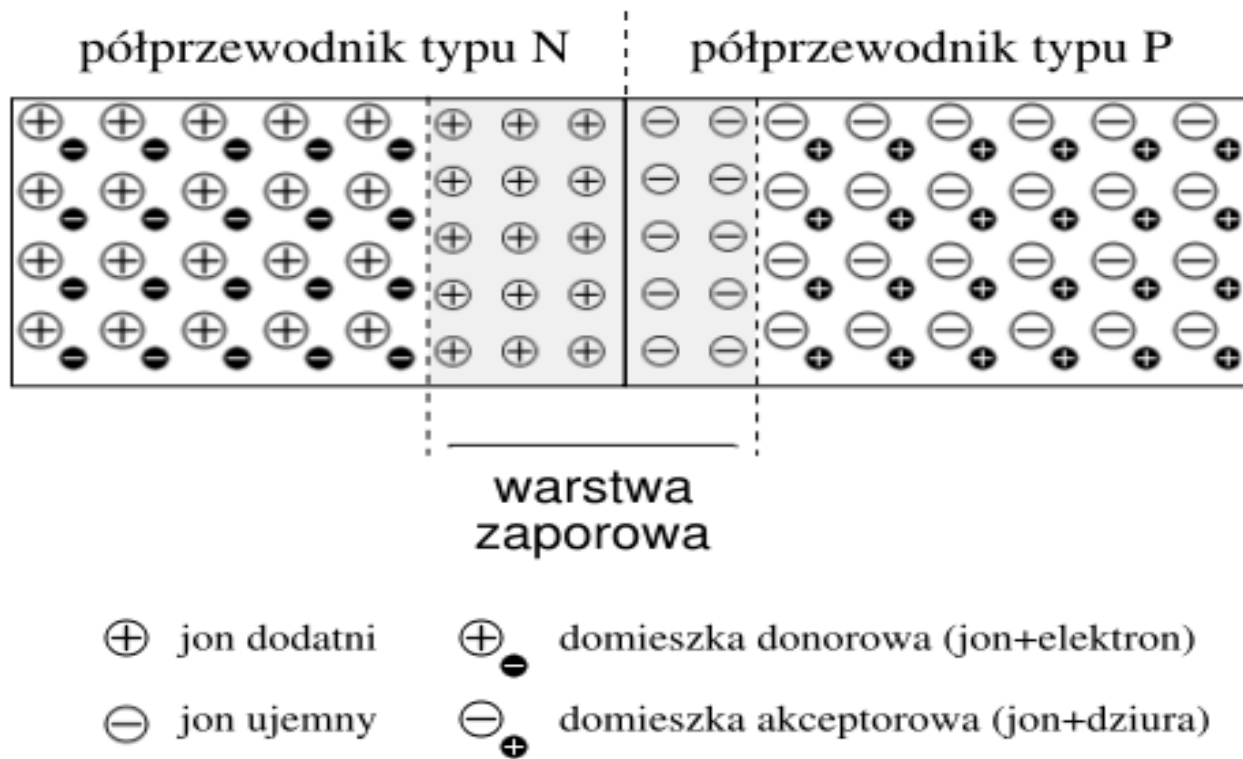
Domieszki w krzemie

akceptory	półprzewodniki	donory
grupa III	grupa IV	grupa V
<u>bor 5</u>	Węgiel 6	<i>azot 7</i>
<i>aluminium 13</i>	<u>krzem 14</u>	<u>fosfor 15</u>
gal 31	german 32	<u>arsen 33</u>
ind 49	węglík krzemu (SiC) krzemogerman (SiGe)	antymon 51

Podstawowe domieszki w krzemie to: bor (akceptor) i fosfor (donor)

Pierwiastki zaznaczone kolorem **brązowym** wchodzą w reakcje chemiczne z krzemem i nie mogą być stosowane jako **domieszki**

Złącze niespolaryzowane



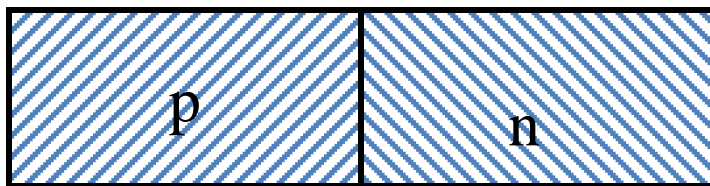
Złącze niespolaryzowane

W stanie równowagi termodynamicznej tj. gdy z zewnątrz nie przyłożono żadnego pola elektrycznego, w pobliżu styku obszarów P i N swobodne nośniki większościowe przemieszczają się (dyfundują), co spowodowane jest różnicą koncentracji nośników. Gdy elektrony przemieszczają się do obszaru typu P, natomiast dziury do obszaru typu N (stając się wówczas nośnikami mniejszościowymi) dochodzi do **rekombinacji** z nośnikami większościowymi, które nie przeszły na drugą stronę złącza. Rekombinacja polega na "połączeniu" elektronu z dziurą, a więc powoduje "unieruchomienie" tych dwu swobodnych nośników.

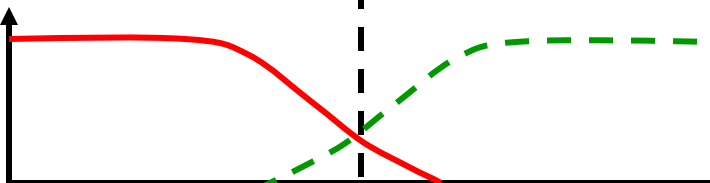
Zatem rekombinacja powoduje redukcję nośników po obu stronach złącza, czego skutkiem jest pojawienie się nieruchomych jonów: ujemnych akceptorów i dodatnich donorów; jony te wytwarzają pole elektryczne, które zapobiega dalszej dyfuzji nośników. W efekcie w pobliżu złącza powstaje **warstwa ładunku przestrzennego**, nazywana też **warstwą zubożoną** (tj. praktycznie nieposiadającą swobodnych nośników) lub **warstwą zaporową**. Nieruchomy ładunek dodatni po stronie N hamuje przepływ dziur z obszaru P, natomiast ładunek ujemny po stronie P hamuje przepływ elektronów z obszaru N. Innymi słowy przepływ nośników większościowych praktycznie ustaje.

Złącze niespolaryzowane

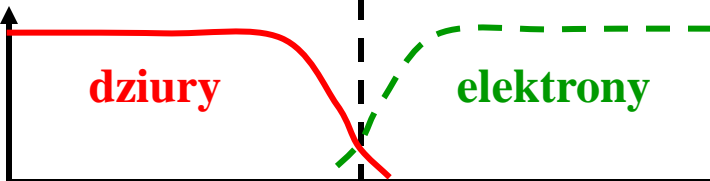
Złącze n-p



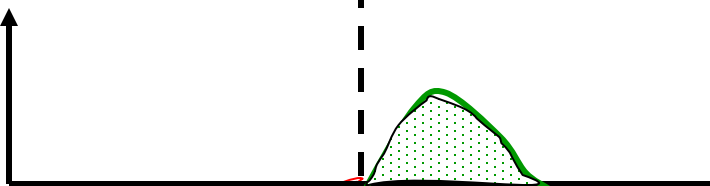
Koncentracja donorów i akceptorów



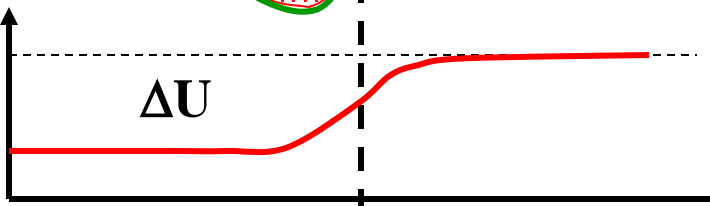
Koncentracja dziur i elektronów



Gęstość ładunku

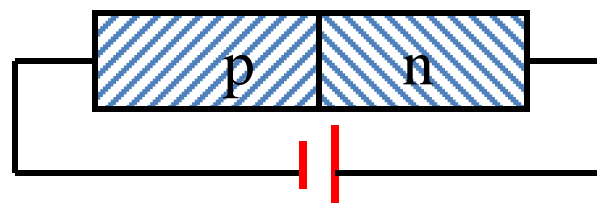


potencjał

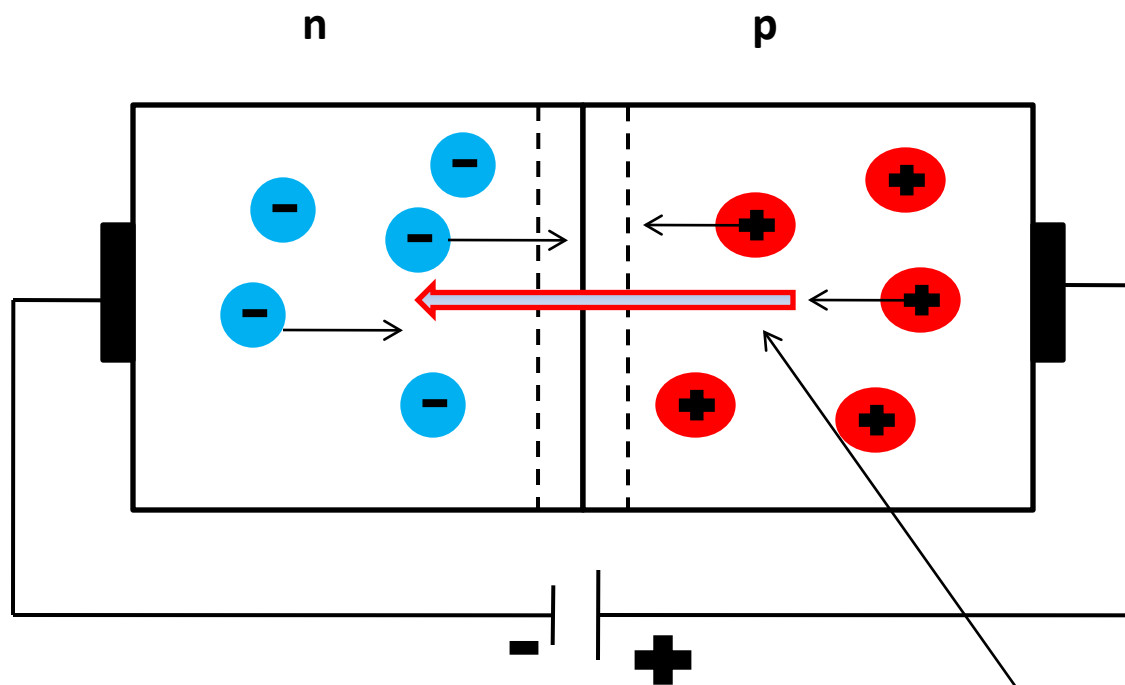


Dzięki dyfuzji elektronów z n do p i dziur z p do n powstaje w warstwie przejściowej strefa ujemnego i dodatniego ładunku przestrzennego stanowiącego warstwę zaporową. W warunkach równowagi termodynamicznej nie płynie prąd elektryczny.

Na wysokość bariery ΔU możemy wpływać przez przyłożenie napięcia do złącza n-p.

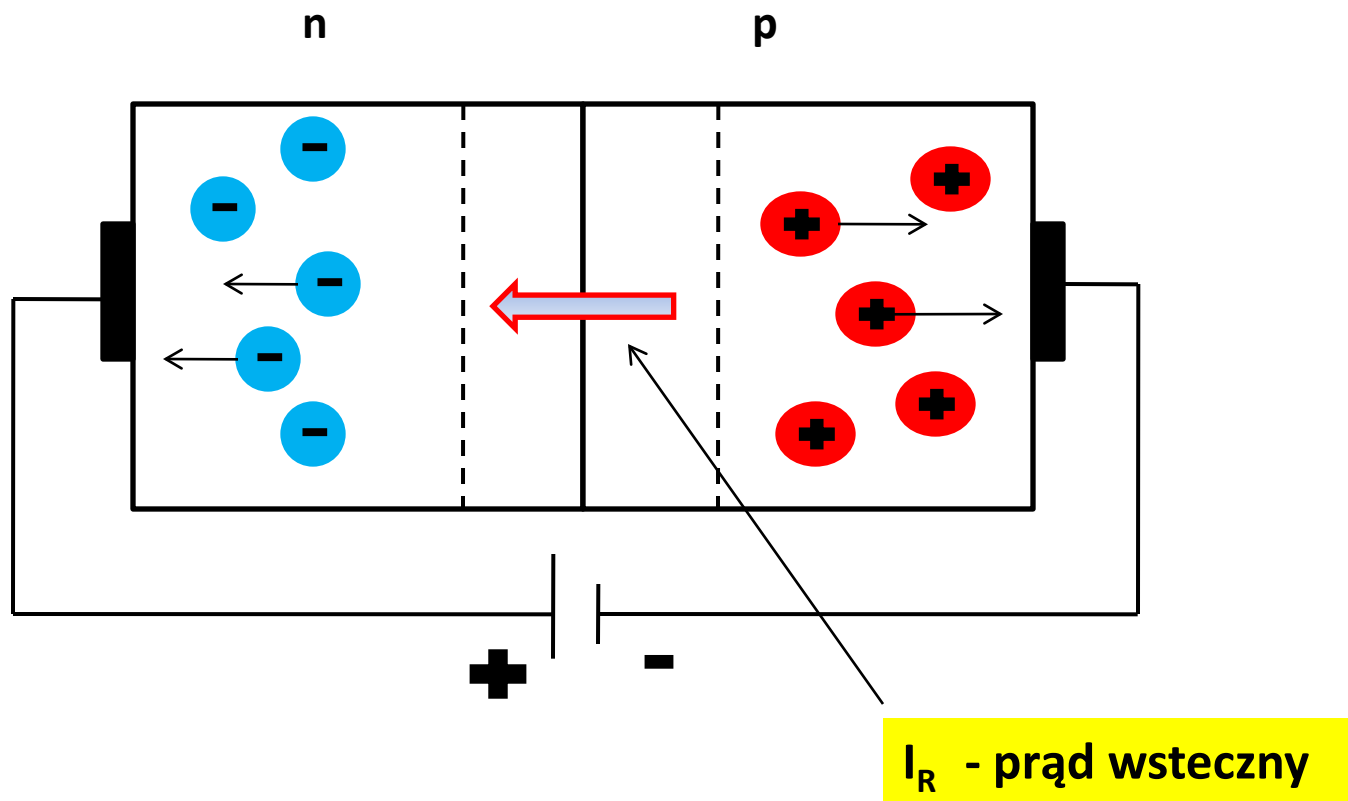


Złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia

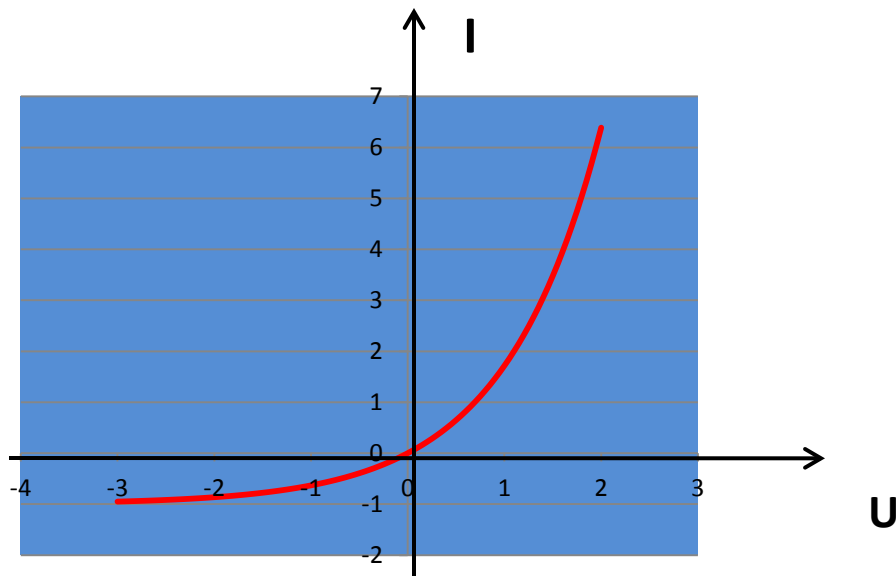


I_F prąd przewodzenia

Złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym



Prąd płynący przez złącze



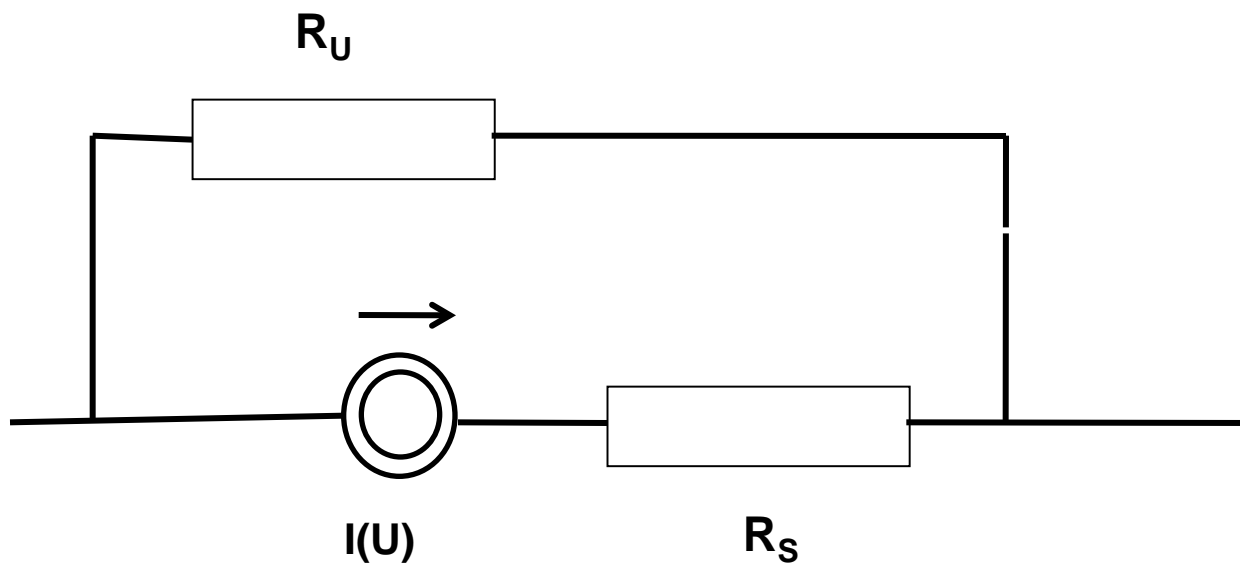
$$I = I_R \left(\exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right)$$

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}$$

potencjał
elektrokinetyczny

T – temperatura
 k – stała Boltzmannna

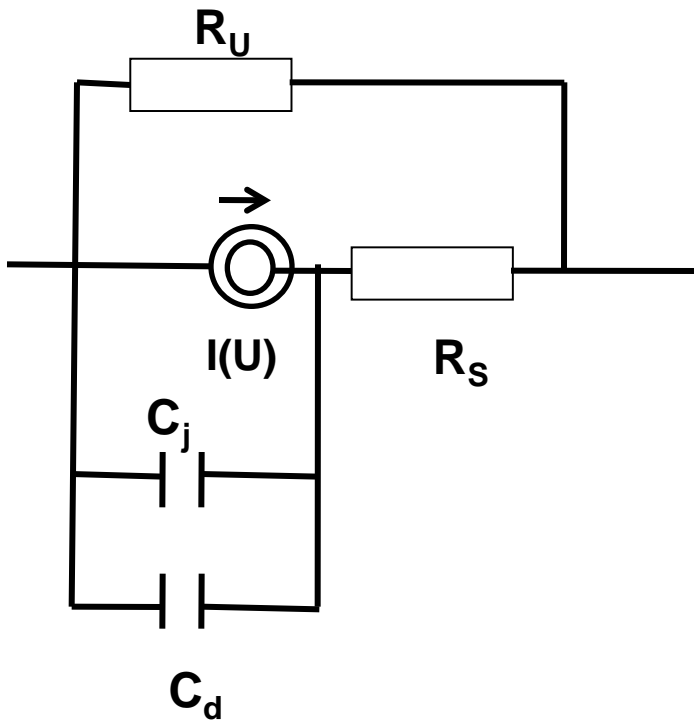
Schemat zastępczy modelu złącza pn



R_U - rezystancja upływu (rzędu $M\Omega$)

R_S - rezystancja szeregową (rzędu Ω)

Schemat zastępczy modelu złącza pn



W warunkach pracy dynamicznej (szybkie zmiany sygnału wymuszającego) musimy uwzględnić zmiany ładunku magazynowanego w warstwie zaporowej. Wprowadzamy do opisu złącza dwie pojemności:

C_j - pojemność złącza

C_d - pojemność dyfuzyjna

Elementy półprzewodnikowe złączowe

Klasyfikacja:

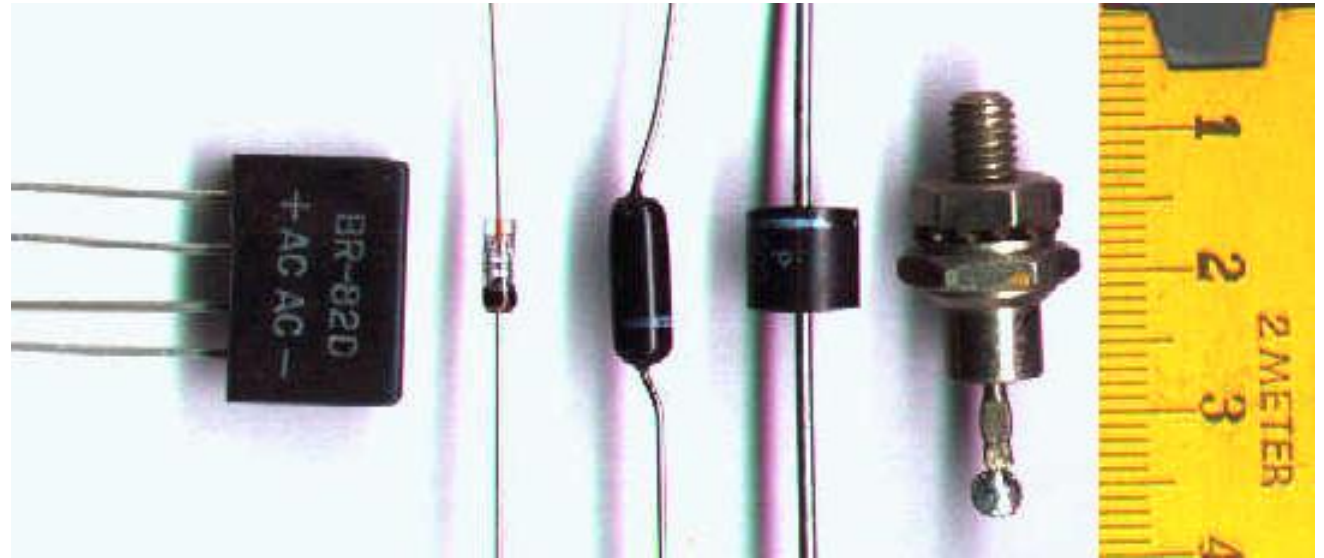
**diody, tranzystory, tyrystory, termistory, fotorezystory,
warystory, gaussotrony, hallotrony**

Złącza:

pn - półprzewodnik-półprzewodnik

MS – metal-półprzewodnik

Dioda

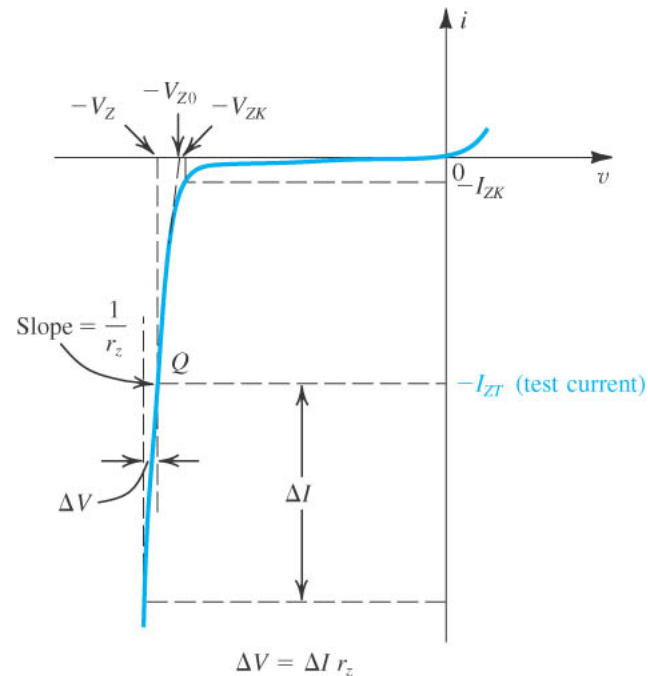
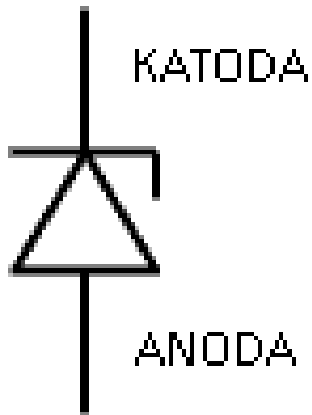


Dioda prostownicza to rodzaj diody przeznaczonej głównie do prostowania prądu przemiennego o małej częstotliwości, której głównym zastosowaniem jest dostarczenie odpowiednio dużej mocy prądu stałego.

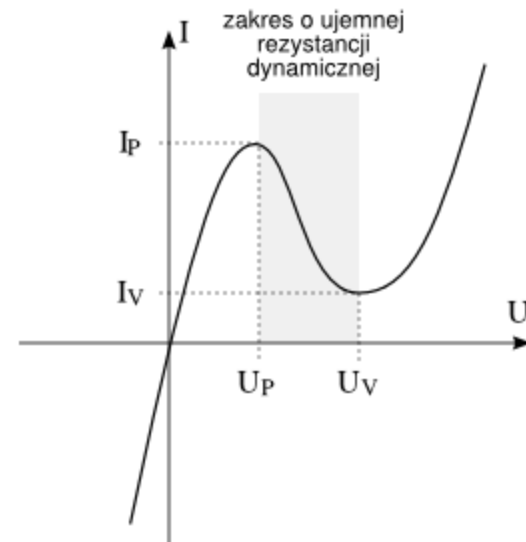
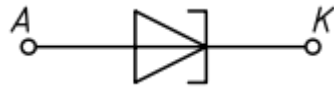
Dioda prostownicza

Dioda Zenera -

Odmiana diody półprzewodnikowej, której głównym parametrem jest napięcie przebicia złącza PN. W kierunku przewodzenia zachowuje się jak normalna dioda, natomiast przy polaryzacji zaporowej może przewodzić prąd po przekroczeniu określonego napięcia na złączu, zwanego napięciem przebicia. Przy niewielkich napięciach (do ok 6V) podstawową rolę odgrywa zjawisko Zenera, powyżej - przebicie lawinowe. Napięcie przebicia jest praktycznie niezależne od płynącego prądu i zmienia się bardzo nieznacznie nawet przy dużych zmianach prądu przebicia (dioda posiada w tym stanie niewielką oporność dynamiczną).



Dioda tunelowa

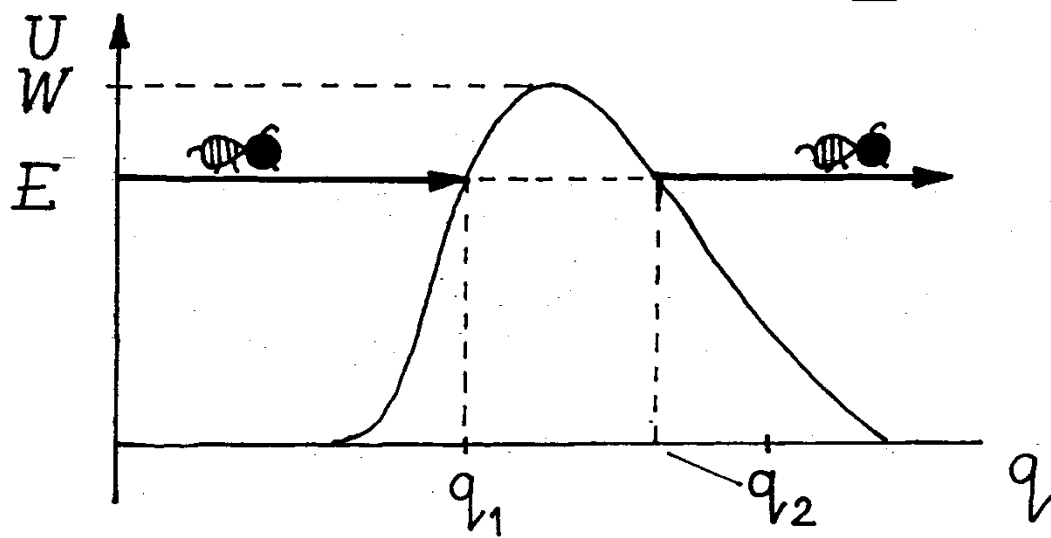


Cienka warstwa zaporowa ($10 \mu\text{m}$)

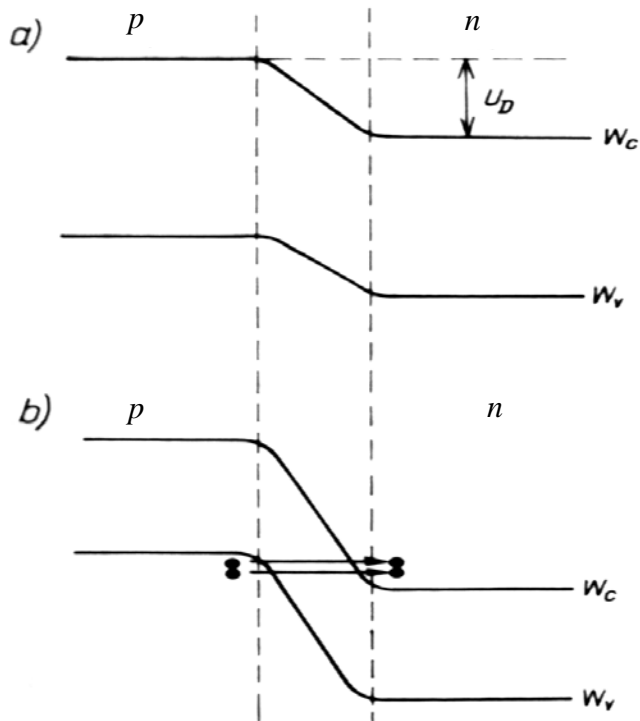
Tunelowe przejście nośników pomiędzy obszarami **n** i **p**

Zastosowanie: generatory i wzmacniacze mikrofalowe w zakresie częstotliwości GHz

Zjawisko tunelowania



Zjawisko tunelowe



Zjawisko tunelowe: występuje w złączach bardzo silnie domieszkowanych, przy polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia. W modelu pasmowym, dno pasma podstawowego półprzewodnika typu P jest powyżej wierzchołka pasma przewodnictwa półprzewodnika typu N. To umożliwia przejście tunelowe nośników z półprzewodnika P do N, a utrudnia przejście w przeciwną stronę nawet przy bardzo małym napięciu polaryzacji.

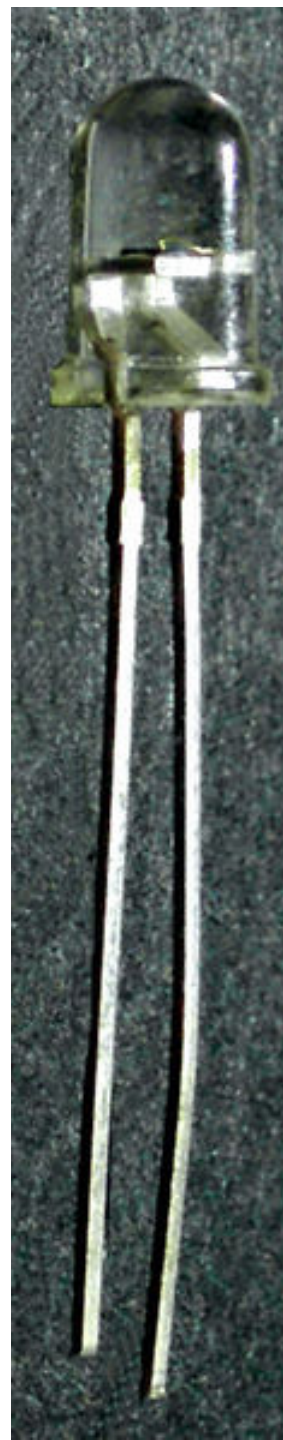
Fotodioda

Półprzewodnikowy element bierny, oparty o złącze P-N, z warstwą zaporową. Brak polaryzacji w momencie oświetlenia półprzewodnika, w złączu powstaje siła elektromotoryczna (**fotoprąd** lub zjawisko fotowoltaiczne).

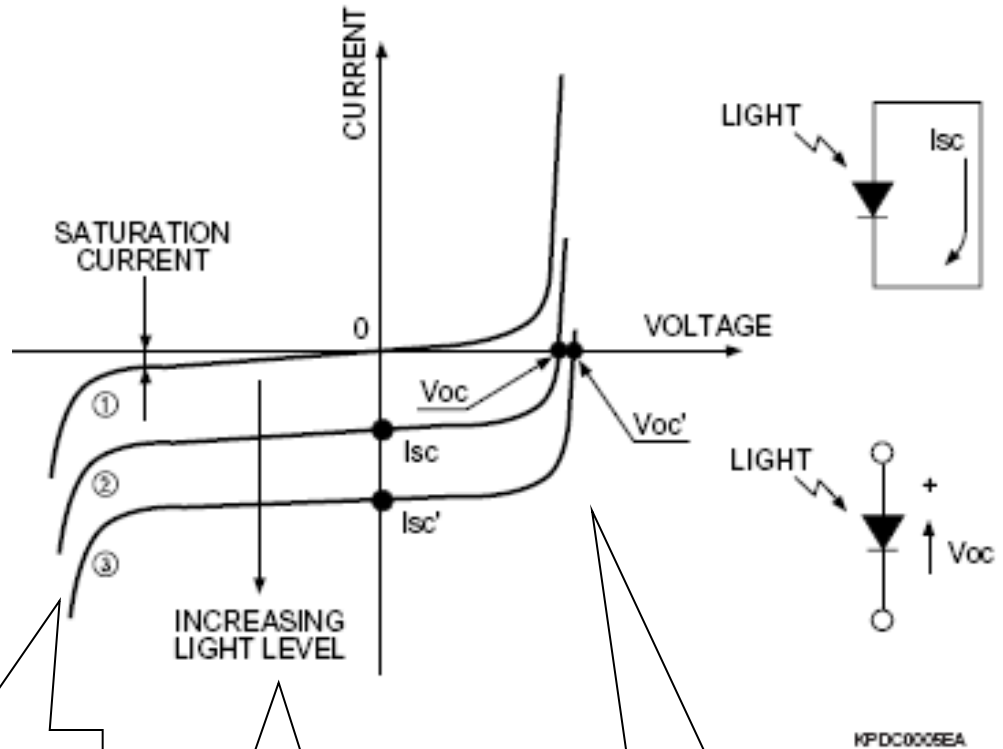
Zastosowania:

- przy braku polaryzacji - bateria słoneczna
- przy polaryzacji zaporowej - nieliniowy rezystor, w którym opór zależy od strumienia światła.

W obu przypadkach można wykorzystać fotodiode jako detektor.



Fotodioda

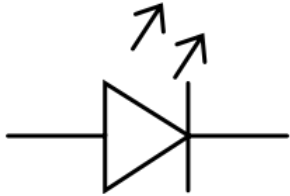


Zakres powielania lawinowego

Tryb prądowy

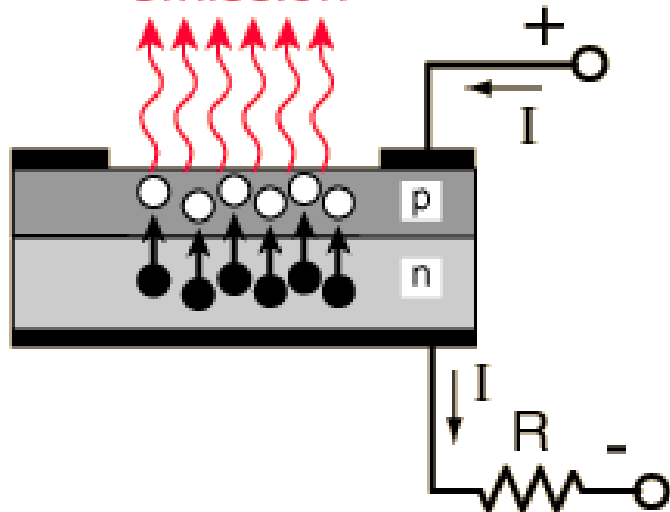
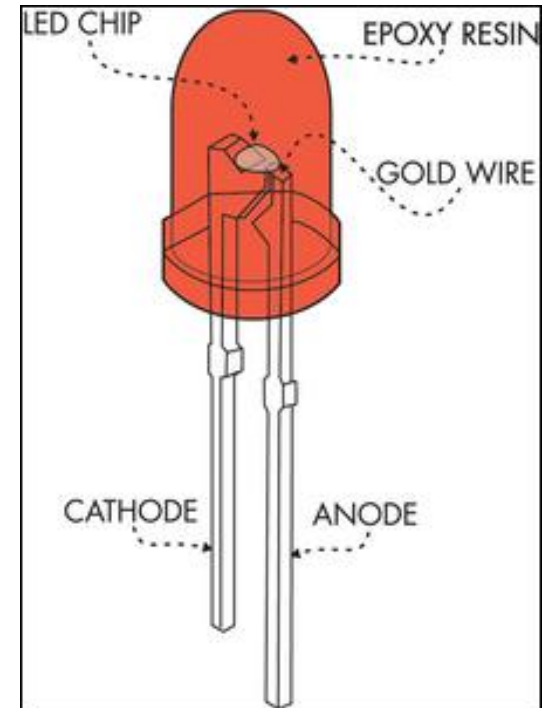
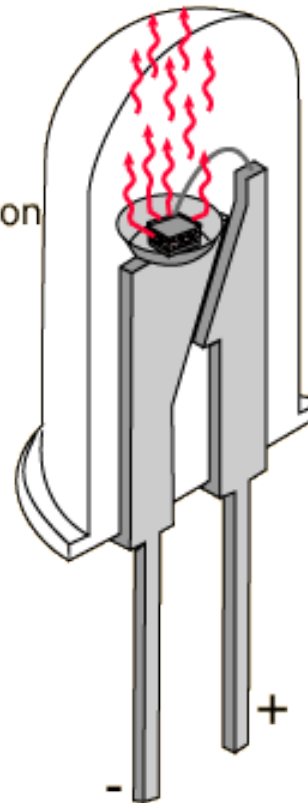
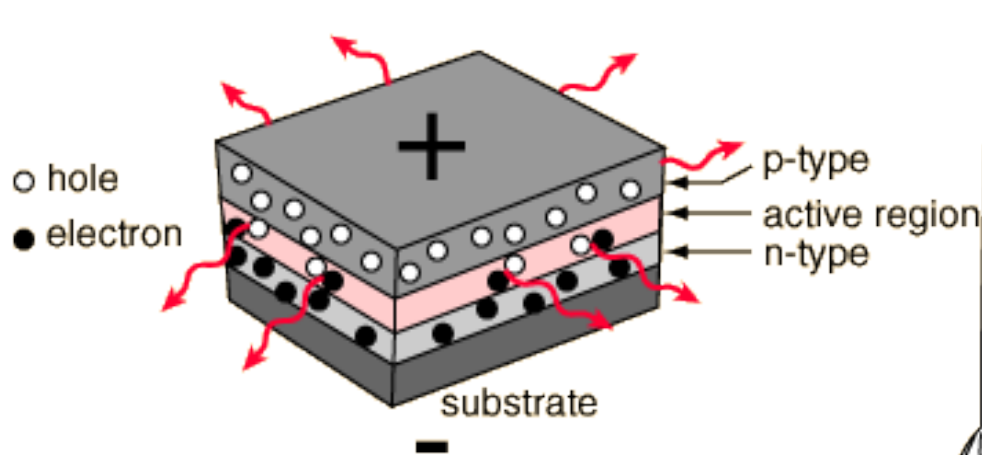
Tryb fotowoltaiczny

Dioda świecąca, LED (ang. *Light Emitting Diode*)



dioda zaliczana do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie w zakresie światła widzialnego, jak i podczerwieni. Pojawiła się w latach sześćdziesiątych; wynaleziona przez amerykańskiego inżyniera - Nicka Holonyaka.. Jej działanie opiera się na zjawisku rekombinacji nośników ładunku (**rekombinacja promienista**). Zjawisko to zachodzi w półprzewodnikach wówczas, gdy elektrony przechodząc z wyższego poziomu energetycznego na niższy zachowują swój **pseudo-pęd**. Jest to tzw. przejście proste. Podczas tego przejścia energia elektronu zostaje zamieniona na kwant promieniowania elektromagnetycznego. Przejścia tego rodzaju dominują w półprzewodnikach z prostym układem pasowym, w którym minimum pasma przewodnictwa i wierzchołkowi pasma walencyjnego odpowiada ta sama wartość pędu.

Diody LED

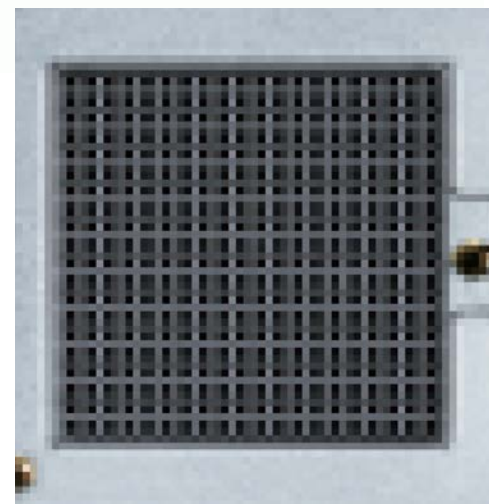
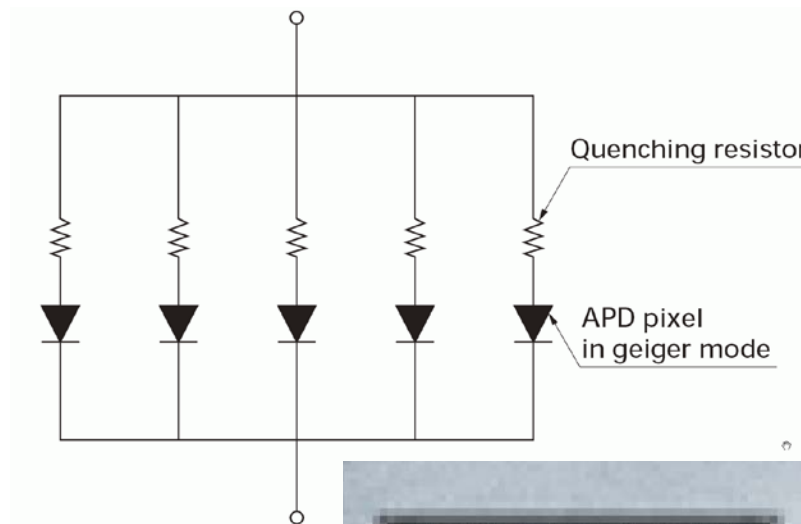


UV - AlGaN
Blue - GaN, InGaN
Red, green - GaP
Red, yellow - GaAsP
IR - GaAs

Diody LED

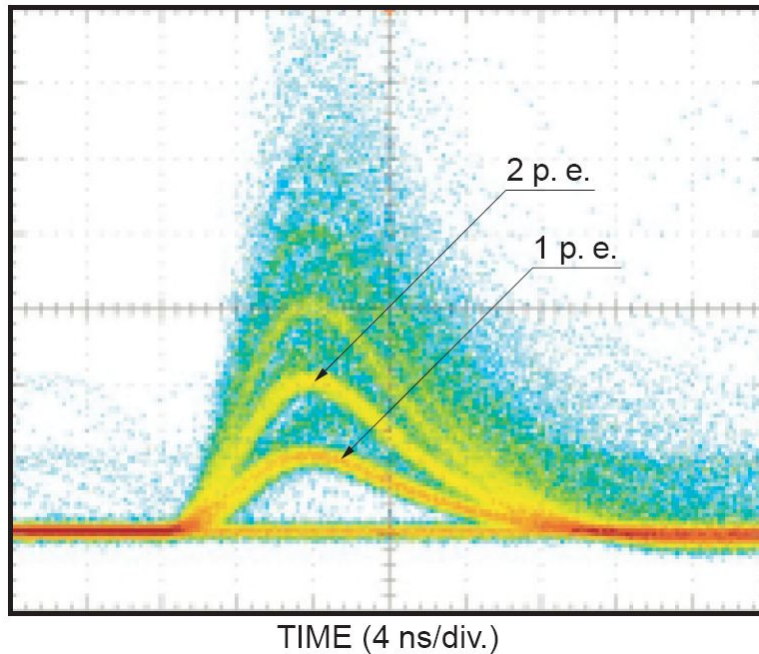
	Color	Wavelength (nm)	Voltage (V)	Semiconductor Material
	Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe), Indium gallium nitride (InGaN), Silicon carbide (SiC) as substrate, Silicon (Si)
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultra-violet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	diamond (235 nm), Boron nitride (215 nm), Aluminium nitride (AlN) (210 nm) Aluminium gallium nitride (AlGaN) (AlGaInN) — (to 210 nm)
	White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

MPPC – *Multi-Pixel Photon Counter*



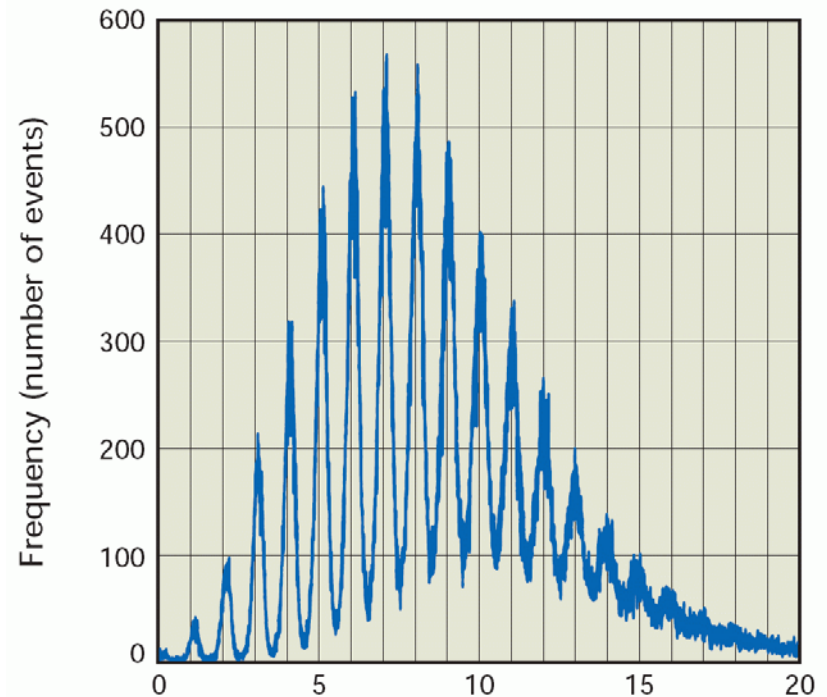
Matryca niezależnych fotodiod lawinowych pracujących w trybie Geigerowskim umożliwia quasi-analogowy odczyt natężenia światła (z kwantem odpowiadającym - w pierwszym przybliżeniu - jednemu fotonowi)

Sygnal z MPPC



Każdy pik odpowiada innej ilości „zapalonych” komórek. (Nie jest to tożsame z ilością fotonów.)

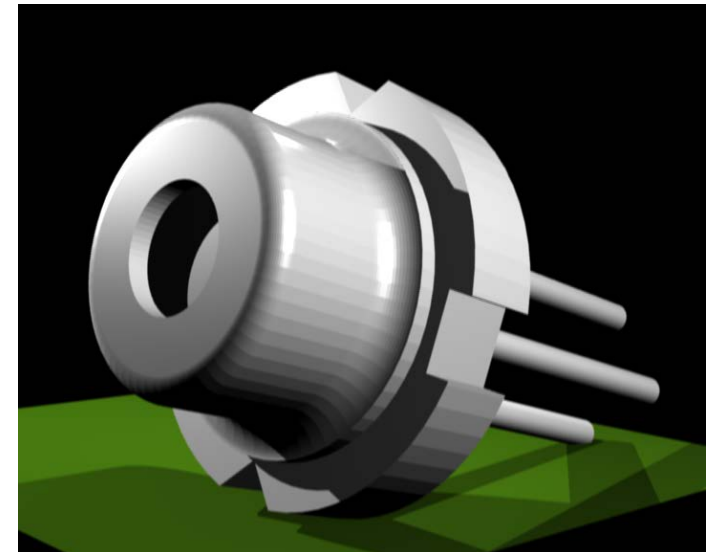
Wyraźnie widać skwantowanie sygnału



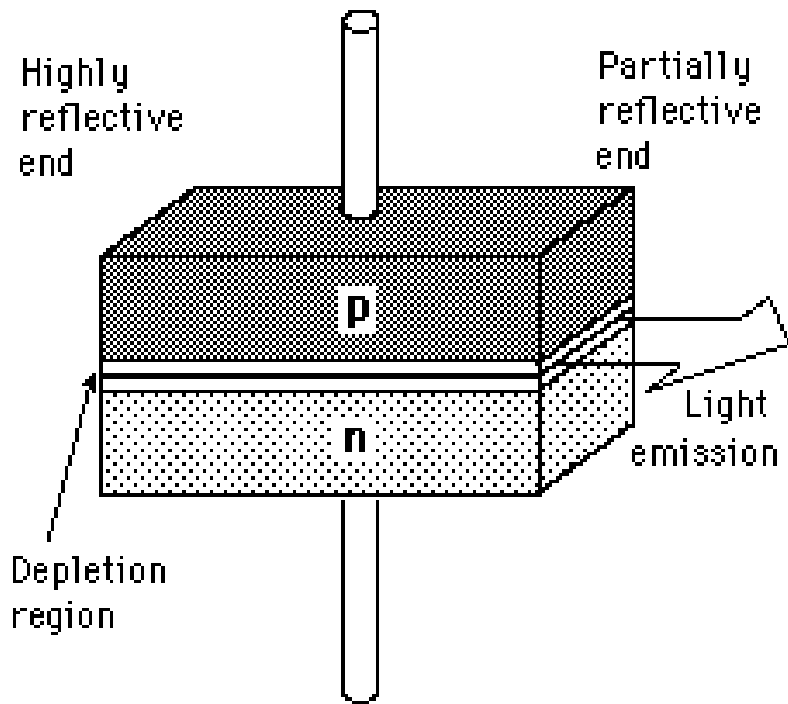
Dioda laserowa

laser półprzewodnikowy, w którym medium emitującym światło jest złącze p-n analogiczne do źródła światła w diodzie LED. W odróżnieniu od zwykłej diody elektroluminescencyjnej, dioda laserowa jest zbudowana tak, by stworzyć wokół złącza rezonator optyczny, co przy odpowiednio wysokim napięciu i prądzie zasilania sprzyja emisji wymuszonej, i powstaniu spójnej, monochromatycznej wiązki światła.

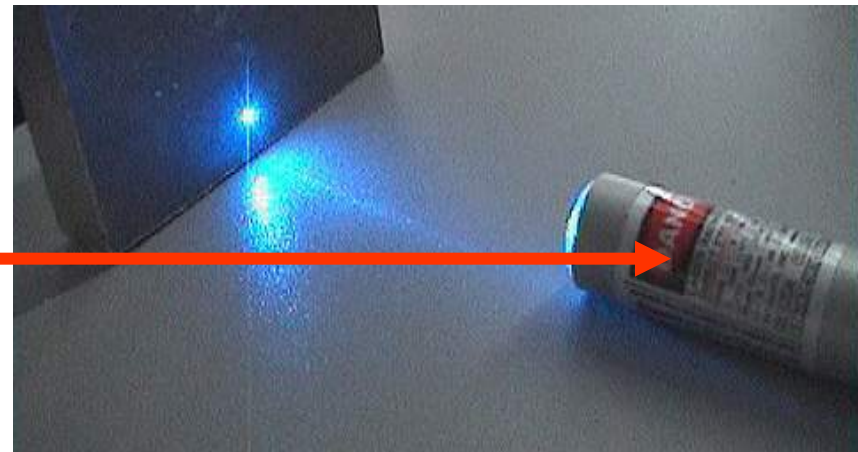
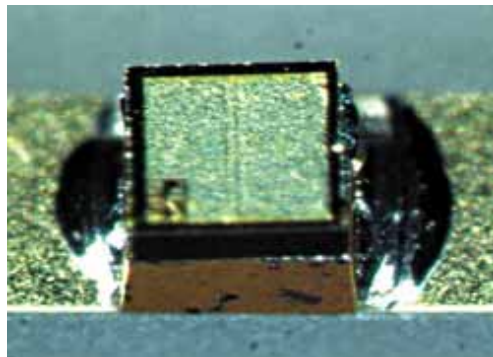
Ze względu na niewielkie rozmiary oraz niskie koszty produkcji diody laserowe są dzisiaj najczęściej wykorzystywanym rodzajem laserów, i znajdują zastosowanie między innymi w napędach CD, napędach Blu-ray, napędach HD DVD, wskaźnikach laserowych, łączności światłowodowej.



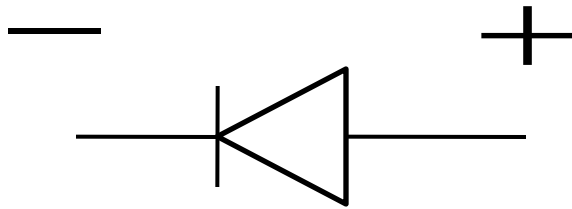
Dioda laserowa



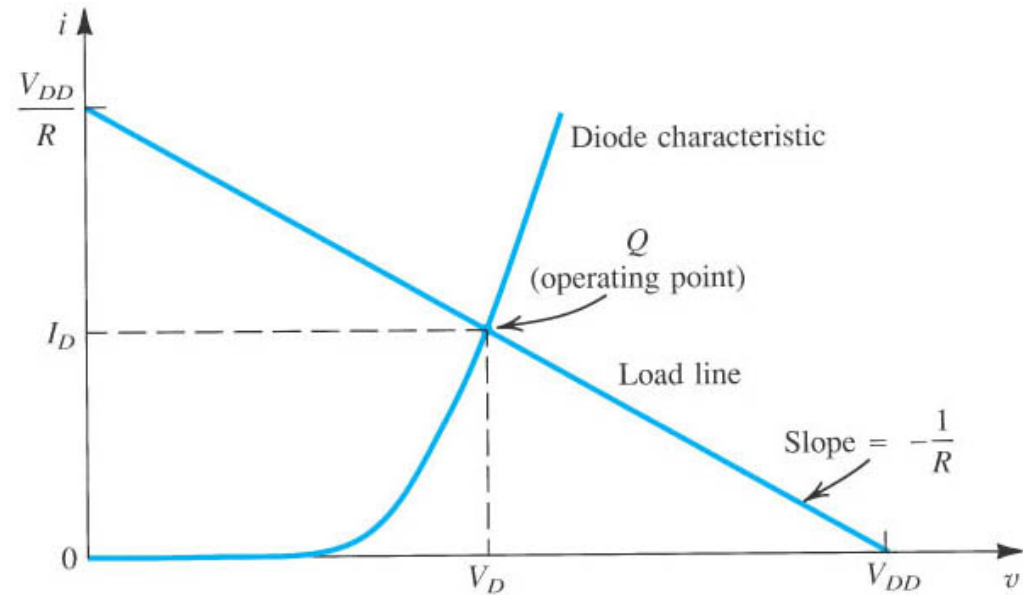
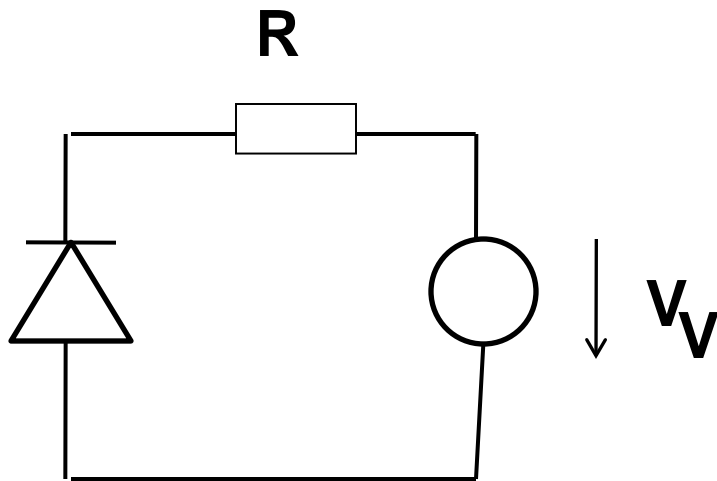
Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation



Dioda n-p



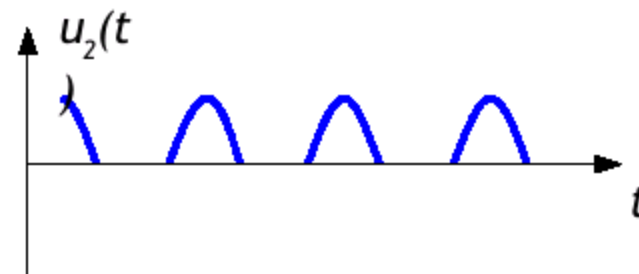
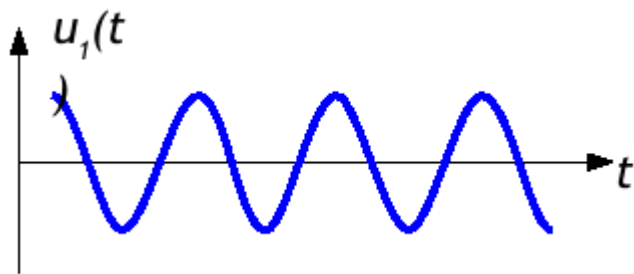
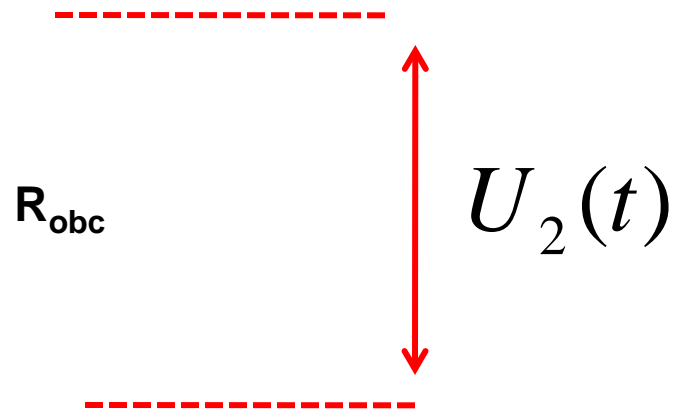
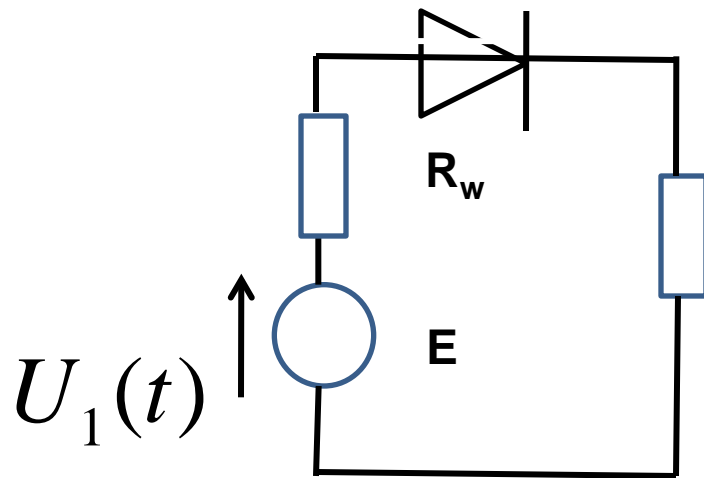
$$I_D = f(V_D)$$



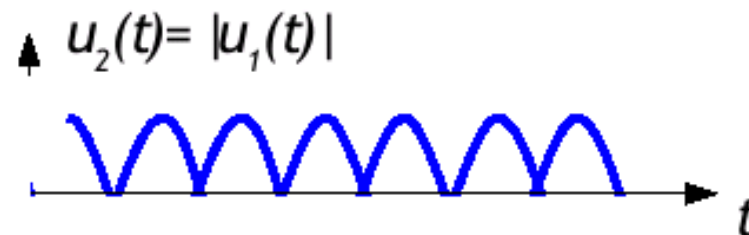
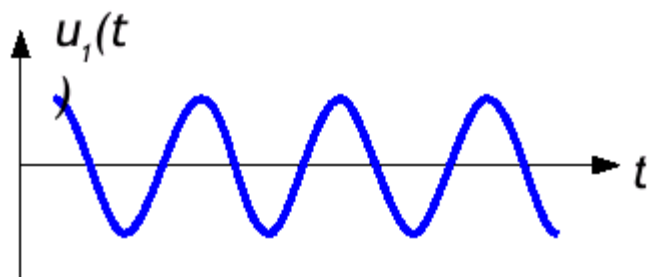
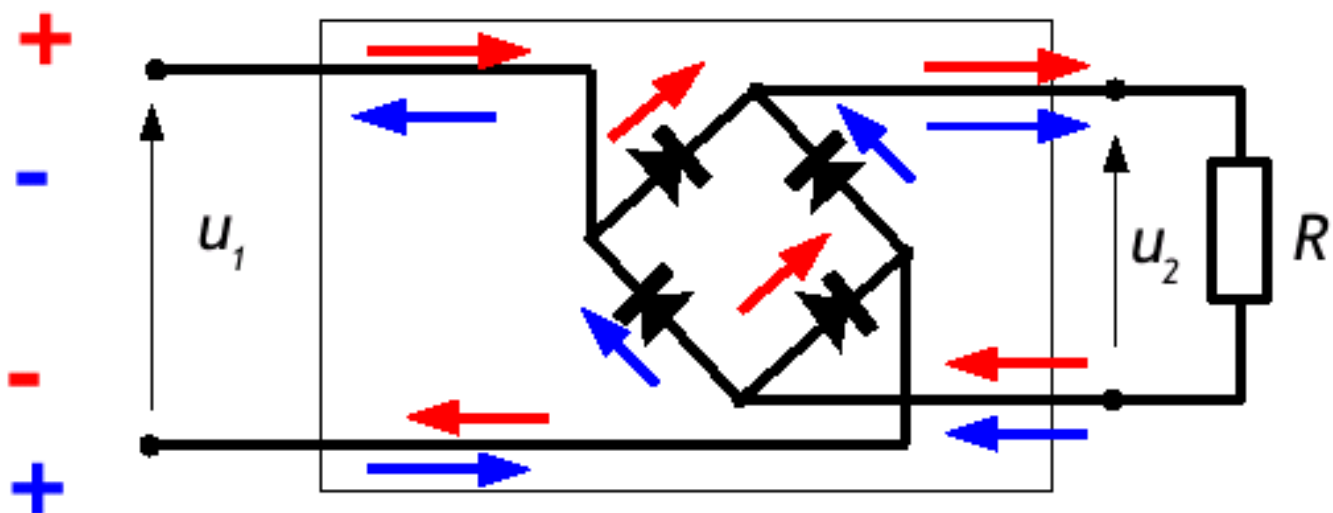
$$r = \left(\frac{dV_D}{dI_D} \right)_{I_D, V_D}$$

Rezystancja dynamiczna diody w punkcie pracy

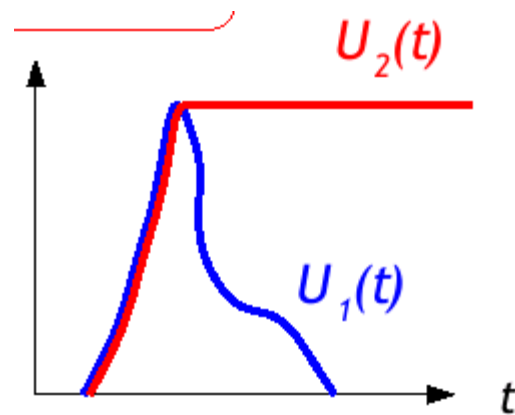
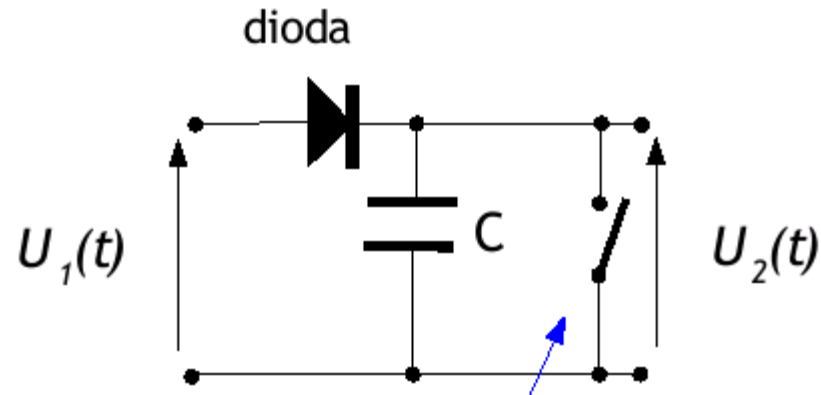
Układ prostowniczy jednopółkowy



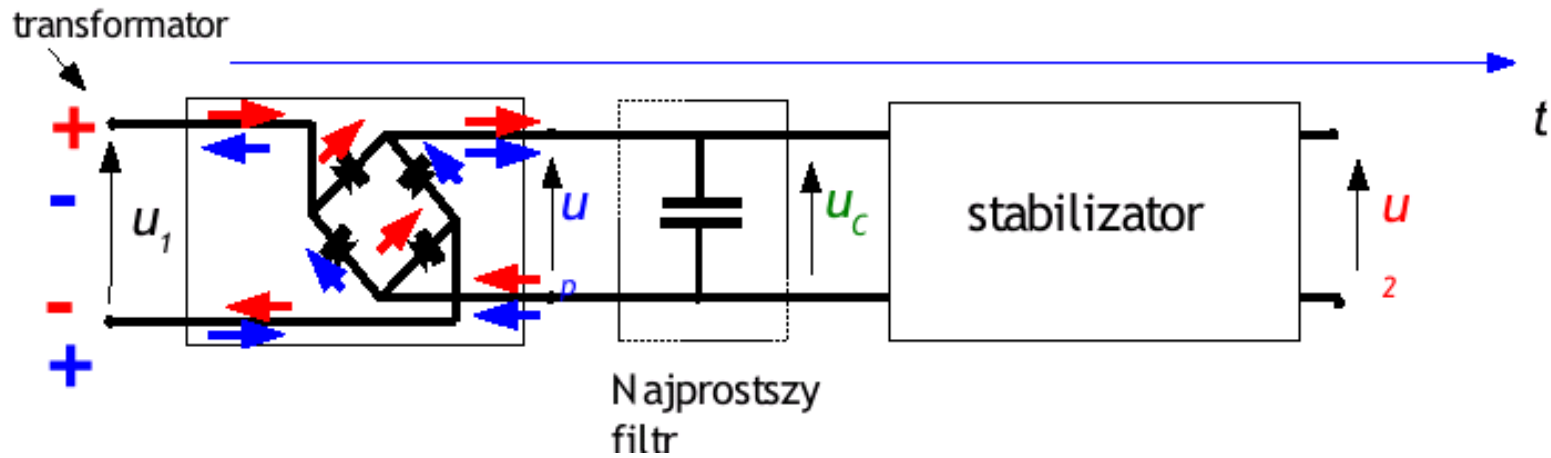
Prostownik pełnookresowy mostkowy



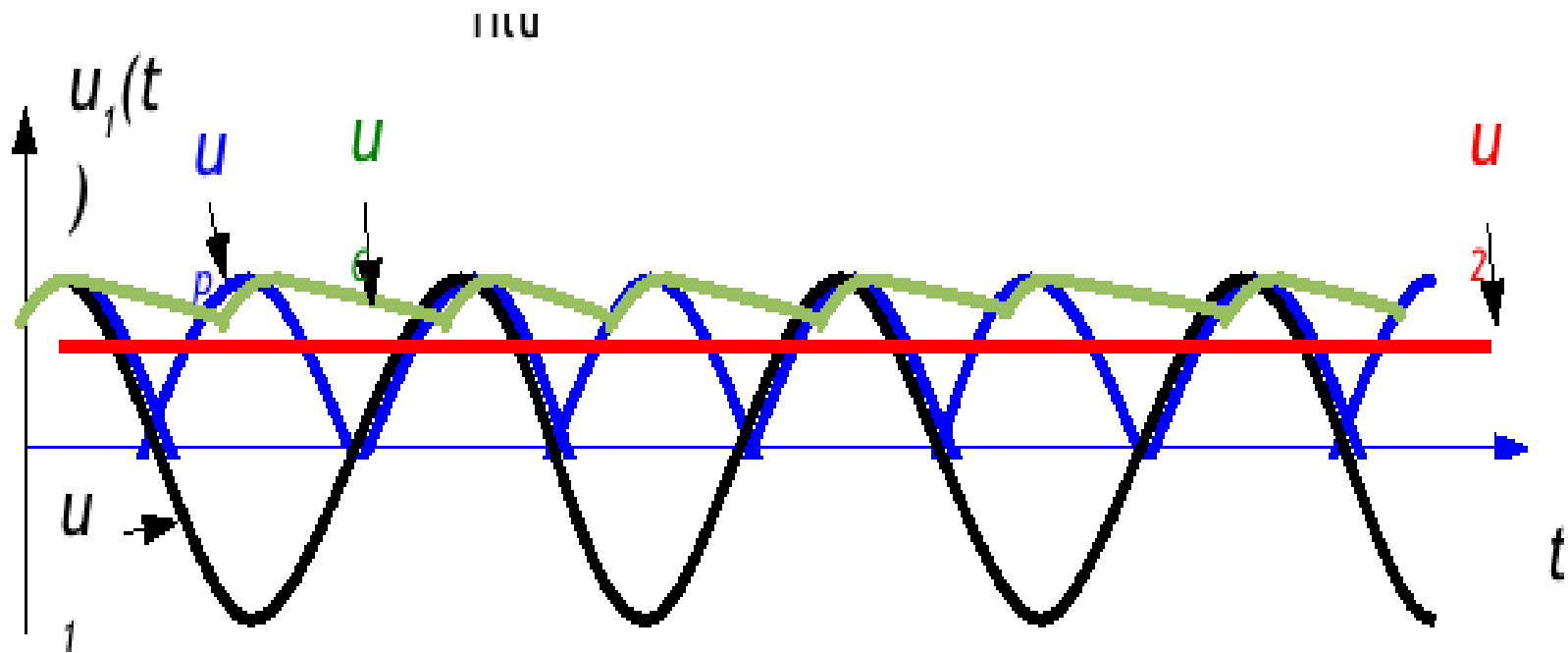
Filtry wygładzające



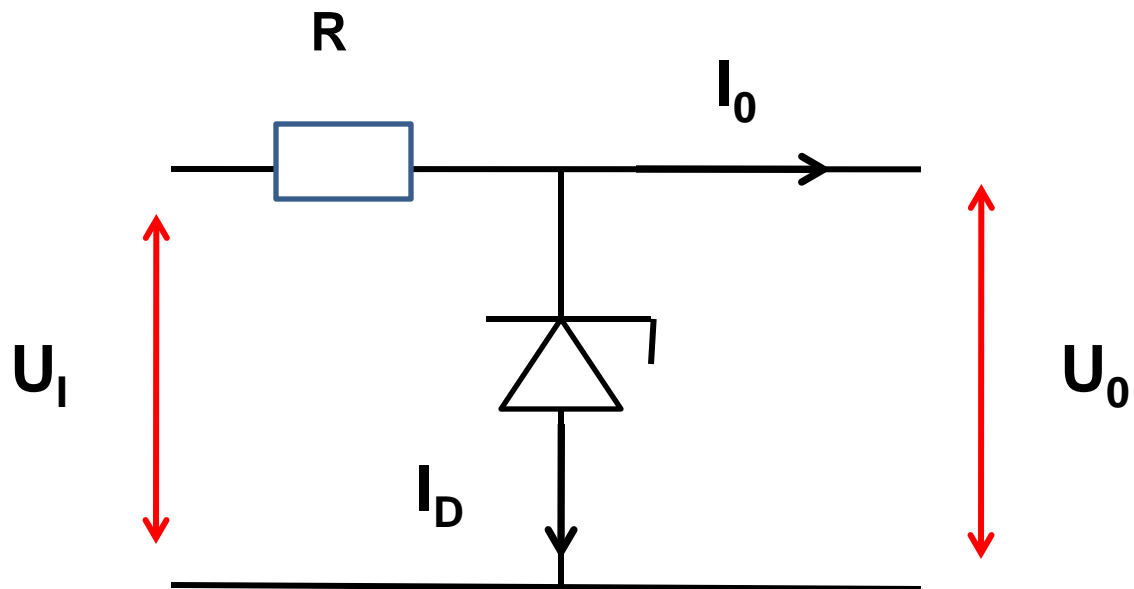
Stabilizatory elektroniczne



Stabilizatory elektroniczne



Stabilizator napięcia z diodą Zenera



Charakterystyka stabilizator napięcia z diodą Zenera

