

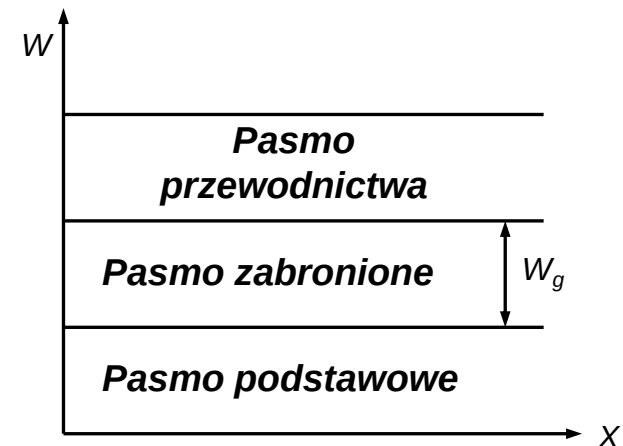
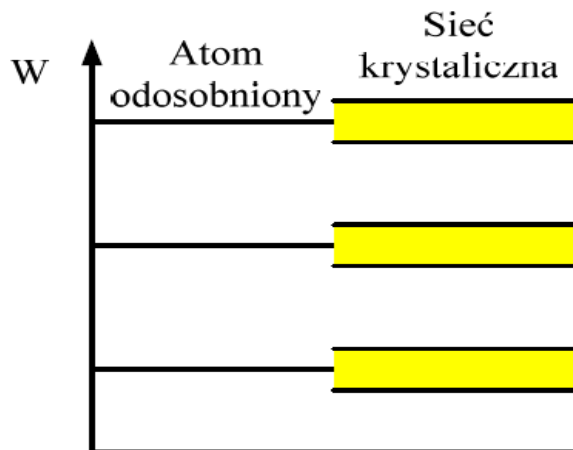
MATERIAŁY PÓŁPRZEWODNIKOWE

Półprzewodniki obejmują obszerną grupę materiałów, które ze względu na przewodnictwo elektryczne zajmują pośrednie miejsce pomiędzy metalami a izolatorami. Półprzewodniki stanowią oddzielną klasę substancji, gdyż ich przewodnictwo ma szereg charakterystycznych cech. Należy podkreślić odwrotną niż dla metali zależność przewodnictwa elektrycznego od temperatury. W dostatecznie niskich temperaturach półprzewodnik staje się izolatorem. W szerokim zakresie temperatur przewodnictwo przewodników szybko rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Drugą ważną cechą półprzewodników jest zmiana przewodnictwa elektrycznego w wyniku niewielkich zmian ich składu.

MODEL PASMOWY

Teoria pasmowa – jest to teoria kwantowa opisująca stany energetyczne elektronów w kryształach. Elektron poruszający się po n – tej orbicie ma określoną energię. Przejście z orbity na orbitę związane jest ze zmianą energii i może odbywać się tylko w sposób skokowy. Mówimy w tym wypadku o zjawisku kwantowania orbit

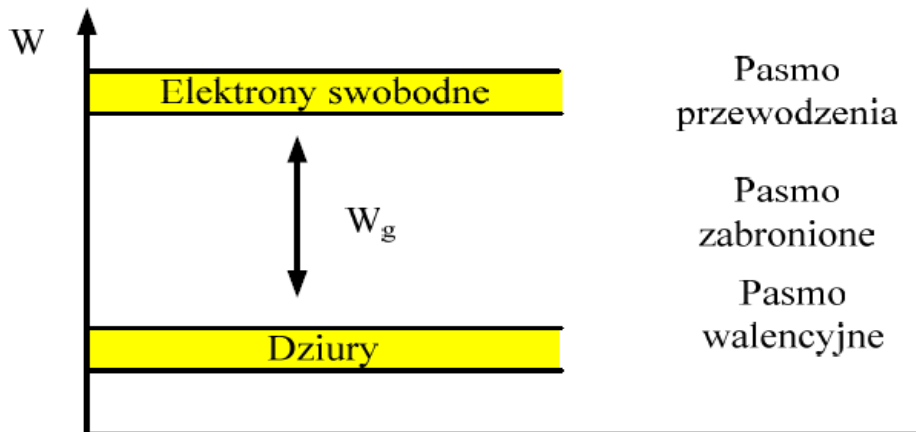
W odróżnieniu od atomów, w których dozwolone stany energetyczne elektronów stanowią zbiór poziomów dyskretnych, dozwolone elektronowe stany energetyczne w kryształach mają charakter pasm o szerokości kilku elektronowoltów.



MODEL PASMOWY

W temperaturze zera bezwzględnego ($T = 0K$) wszystkie elektrony walencyjne są związane z jądrem atomu i zajmują w modelu pasmowym półprzewodnika tzw. pasmo walencyjne. Po dostarczeniu odpowiednio dużej energii jonizacji elektrony te są wyrywane z siatki krystalicznej, ich energia całkowita rośnie i przechodzą one do pasma przewodnictwa. Te swobodne elektrony są nośnikami ujemnego ładunku elektrycznego i tworzą w materiale półprzewodnika prąd elektronowy.

Różnica pomiędzy poziomem energii pasma walencyjnego i przewodnictwa W_g wyznacza szerokość pasma zabronionego.



Aby rozerwać wiązanie atomowe utworzone przez elektrony walencyjne należy dostarczyć do siatki krystalicznej znacznej energii tzw. energii jonizacji. Są trzy podstawowe mechanizmy jonizacji:

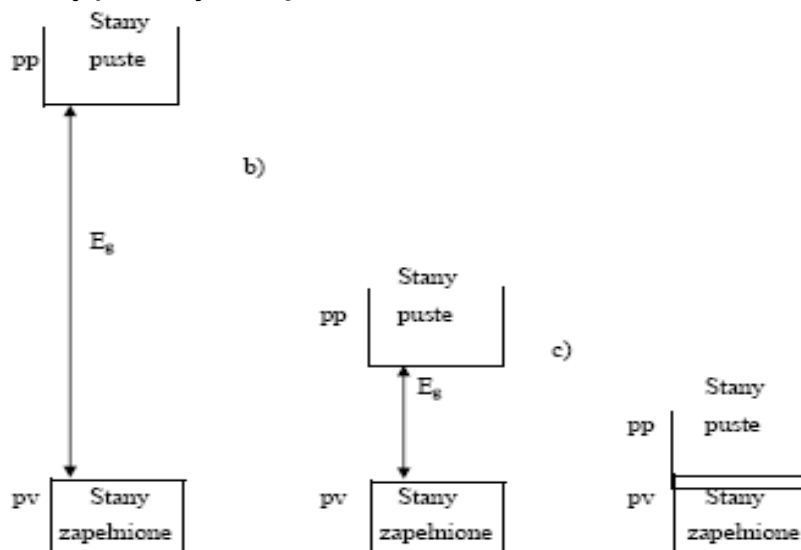
- podgrzanie (promieniowanie cieplne) – generacja termiczna,
- naświetlenie (promieniowanie świetlne w zakresie fal widzialnych i niewidzialne) – fotogeneracja,
- przyspieszenie nośników ładunku w polu elektrycznym i nadanie im takiej energii, że są one w stanie wybić z siatki krystalicznej kolejne elektrony, a te następne itd. tak, że proces ten rozwija się lawinowo – jonizacja zderzeniowa

Półprzewodniki samoistne

Ciała stałe ze względu na ich właściwości elektryczne dzielimy na trzy grupy:

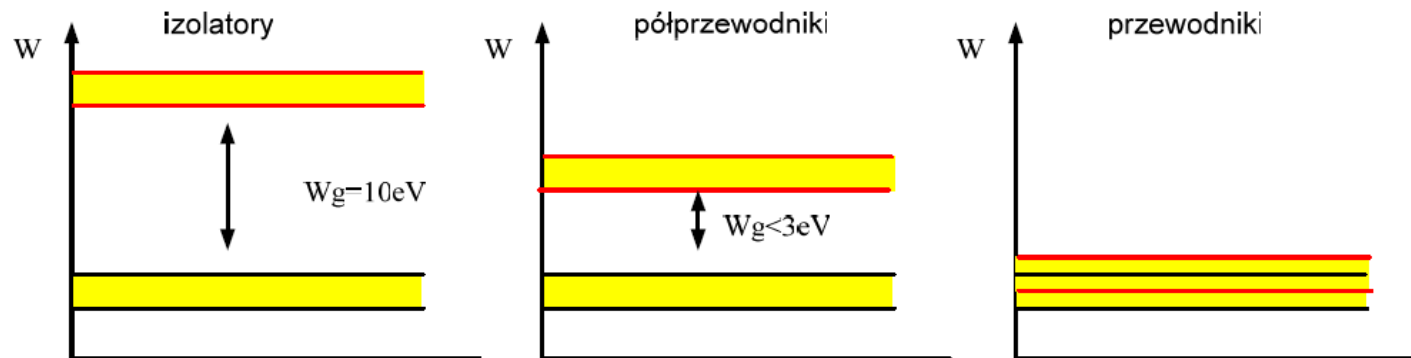
1. przewodniki, w których stany zajęte sąsiadują bezpośrednio ze stanami pustymi (np. metale),
2. izolatory, w których najmniejsza energetyczna odległość między stanami zajętymi elektronami i pustymi zwana przerwą energetyczną (E_g) jest duża, tzn. większa niż 2 eV (np. dla diamentu wynosi ona 5,4 eV),
3. Półprzewodniki, w których przerwa energetyczna jest mniejsza niż 2 eV (np. dla krzemu wynosi 1,1 eV). Na rys. przedstawiono schematycznie strukturę pasmową tych materiałów oraz ich obsadzenie elektronami w temperaturze zera bezwzględnego.

W wyższych temperaturach wskutek oddziaływania elektronów z termicznymi drganiami sieci kryształu część z nich może uzyskać energię wystarczająco dużą by przejść z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa i brać udział w przewodnictwie prądu elektrycznego. Elektrony takie nazywamy swobodnymi, gdyż mogą poruszać się po całym kryształ.



Struktura pasmowa ciał stałych w $T=0K$:
a) izolatorów, b) półprzewodników,
c) przewodników (nałożenie się dwu pasm):
pp – pasmo przewodnictwa,
pv – pasmo walencyjne,
 E_g – przerwa zabroniona.

Ilość swobodnych elektronów w półprzewodniku jest stosunkowo mała i dlatego dalsze ogrzewanie półprzewodnika wymusza generację dalszych elektronów swobodnych. Następuje dalszy silny wzrost przewodnictwa, np. ogrzewając czysty krzem od 0 do $200^{\circ}C$ obserwujemy wzrost jego przewodnictwa od 10^{-7} do $10^{-2} [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}]$, a więc o pięć rzędów wielkości. Ta silna zależność koncentracji nośników ładunku od temperatury jest specyficzną właściwością półprzewodników odróżniającą je od metali, w których koncentracja swobodnych elektronów jest praktycznie stała, niezależna od temperatury.



Szerokość pasma zabronionego W_g wybranych półprzewodników

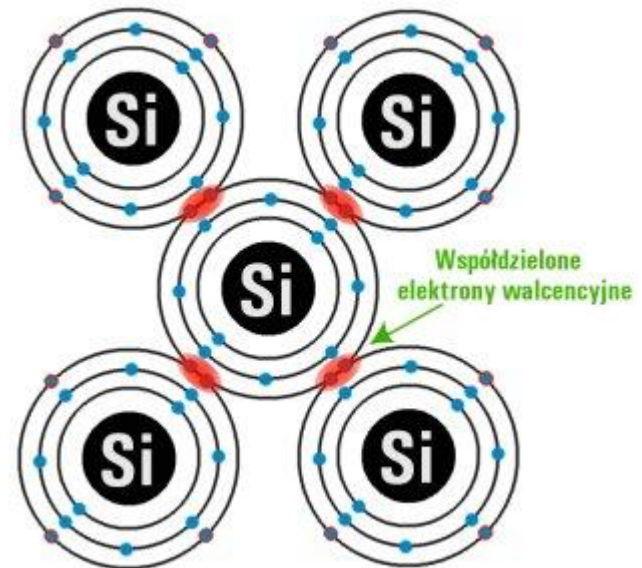
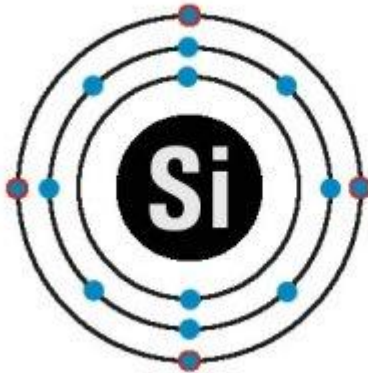
Półprzewodnik	InSb	PbS	Ge	Si	GaAs	Se	CdS
W_g eV	0.18	0.37	0.67	1.12	1.43	1.7	1.9

Podstawowe materiały półprzewodnikowe

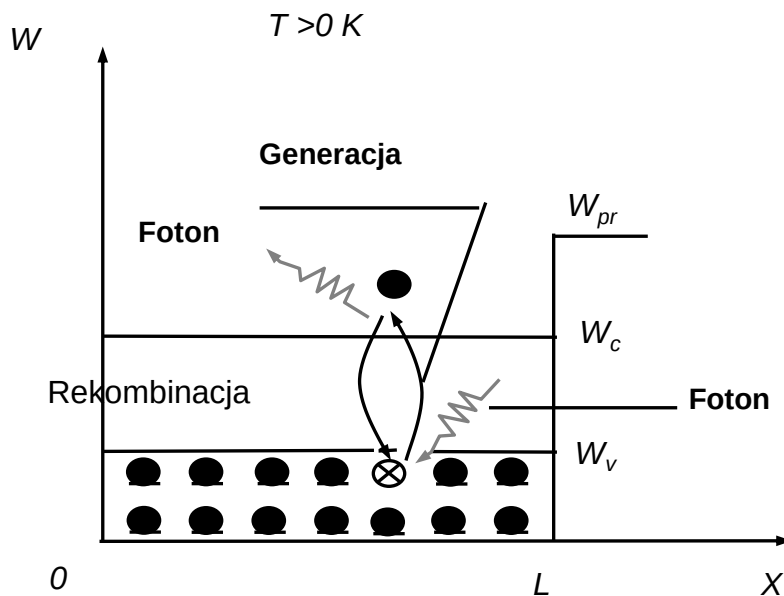
Grupa	Półprzewodnik	Zastosowanie
IV	Si, Ge, SiC	Diody, tranzystory, fotoogniwa, fotodiody, fototranzystory, warystory (VDR)
III-V	Gap, GaAs, GaAsP, InSb, InAs	Diody elektroluminescencyjne (LED), hallotrony, gausotrony
II-VI	CdS, CaSe, MgO	Fotorezystory, termistory (NTC)
IV-VI	PbS, PbSe, Pite	fotorezystory

Podstawowym materiałem do produkcji współczesnych przyrządów półprzewodnikowych jest **krzem (Si)**.

- Każdy atom krzemu ma 14 elektronów.
- Na pierwszej orbicie jest 2 elektrony, na drugiej 8 elektronów.
- Orbita pierwsza i druga są w pełni obsadzone.
- Na orbicie trzeciej jest tylko 4 elektrony na 8 możliwych do obsadzenia miejsc.
- Te cztery elektrony nazywane są elektronami walencyjnymi. Decydują one o aktywności chemicznej i właściwościach elektrycznych krzemu. W tym stanie atom jest obojętny elektrycznie.
- Aby zmienić ten stan należy do atomu doprowadzić z zewnątrz energię, przy czym najłatwiej jest oderwać od atomu elektrony walencyjne.



Przejście elektronu z pasma walencyjnego w półprzewodniku do pasma przewodnictwa oznacza w modelu energetycznym pojawienie się w paśmie walencyjnym wolnego stanu nie obsadzonego elektronem zwanego dziurą. Wytworzona dziura może zostać zajęta przez jeden z sąsiednich związanych elektronów i w rezultacie przesunąć się w inne miejsce. Jest więc ona nośnikiem nieskompensowanego dodatniego ładunku elementarnego. W obecności zewnętrznego pola elektrycznego dziury będą poruszać się w kierunku pola, a wolne elektrony w kierunku przeciwnym. W ten sposób w półprzewodniku występują obok siebie dwa niezależne nośniki prądu. Z omówionego mechanizmu generacji nośników ładunku wynika, że w półprzewodniku powinno być tyle samo elektronów w paśmie przewodnictwa, jak i dziur w paśmie walencyjnym, gdyż w wyniku każdego pojedynczego aktu generacji powstaje para nośników elektron-dziura. Właściwość tę ma każdy czysty materiał półprzewodnikowy o nie zaburzonej strukturze krystalicznej. Półprzewodniki takie nazywamy samoistnymi.



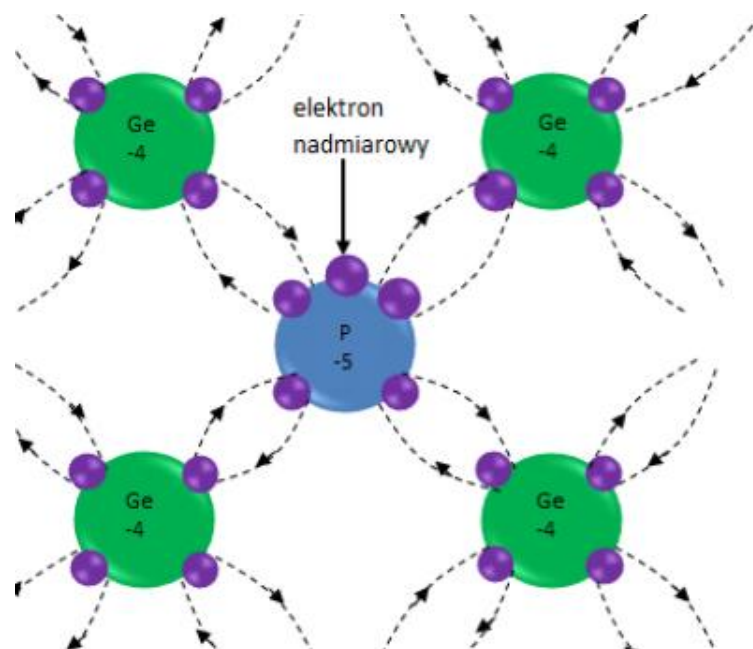
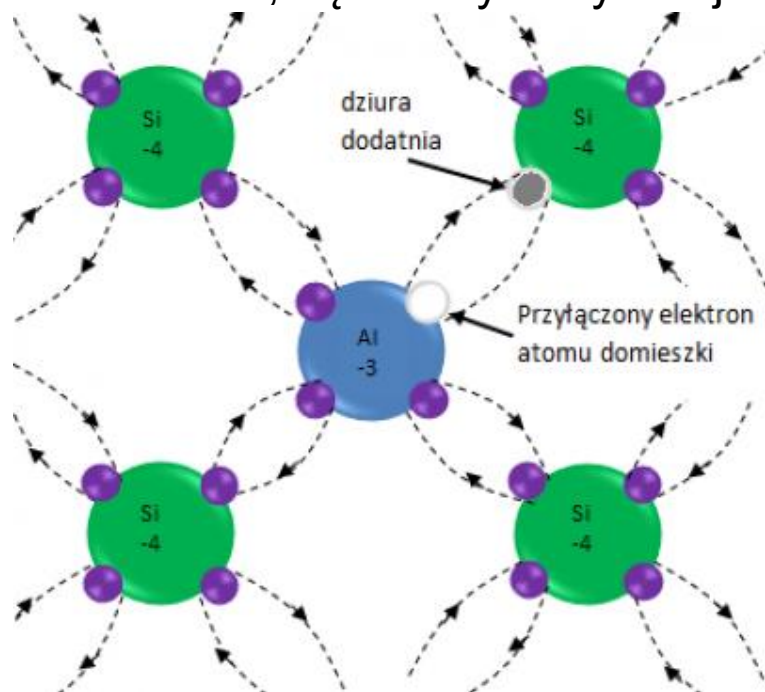
- Sieć krystaliczna półprzewodnika w temperaturze różnej od temperatury zera bezwzględnego drga. Te drgania cieplne są źródłem generacji termicznej par nośników elektron-dziura.
- Szybkość generacji nośników zależy od temperatury oraz rodzaju materiału półprzewodnikowego.
- Ilość nośników ładunku w jednostce objętości nazywa się koncentracją: $n[m^{-3}]$ elektronów oraz $p[m^{-3}]$ dziur.
- Zjawisku generacji termicznej par elektron-dziura towarzyszy zawsze zjawisko przechwytywania elektronów przez dziury, które nazywamy rekombinacją nośników.

Półprzewodnik typu n i typu p (półprzewodniki niesamoistne)

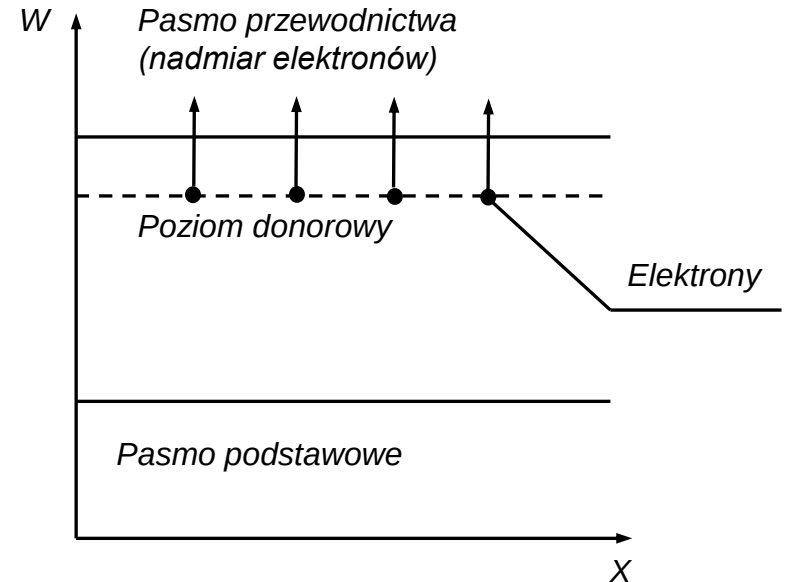
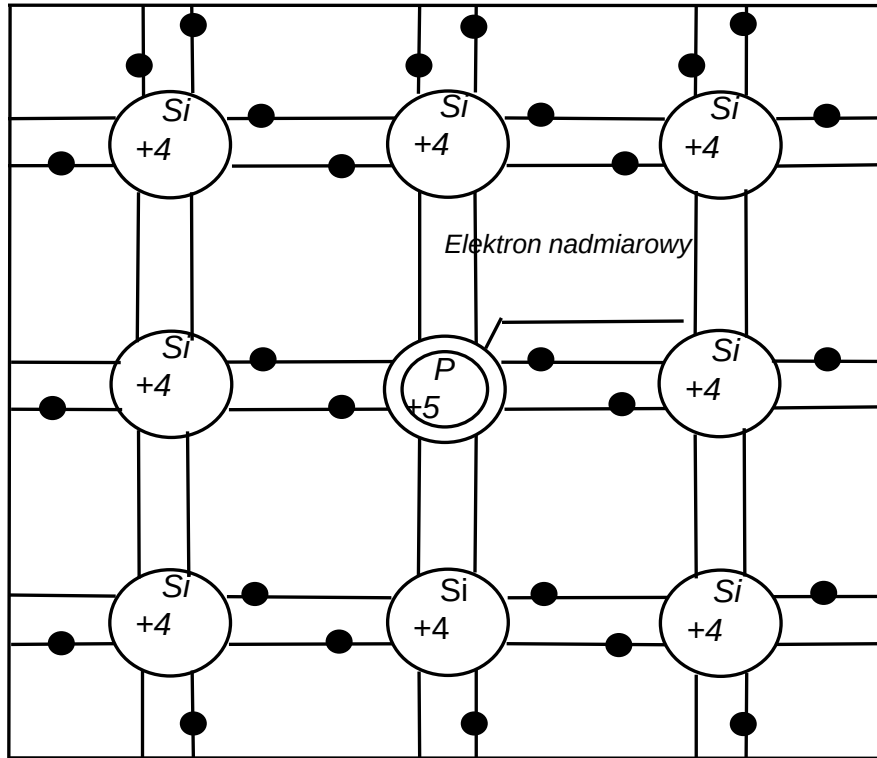
Półprzewodnik niesamoistny jest wówczas, gdy w sieci krystalicznej monokryształu zamiast atomów pierwiastka materiału półprzewodnikowego znajduje się inny atom (np. w sieci krystalicznej krzemu znajduje się fosfor).

Powstaje wówczas tzw. **półprzewodnik domieszkowany**, a ten inny atom nazywamy domieszką. Rozróżniamy dwa rodzaje domieszek: **donorową** i **akceptorową**.

Jeśli na skutek nieregularności sieci krystalicznej w półprzewodniku będą przeważać nośniki typu dziurowego, to półprzewodnik taki nazywać będziemy **półprzewodnikiem typu p** (niedomiarowy). A gdy będą przeważać nośniki elektronowe, będziemy nazywać je **półprzewodnikami typu n** (nadmiarowy).

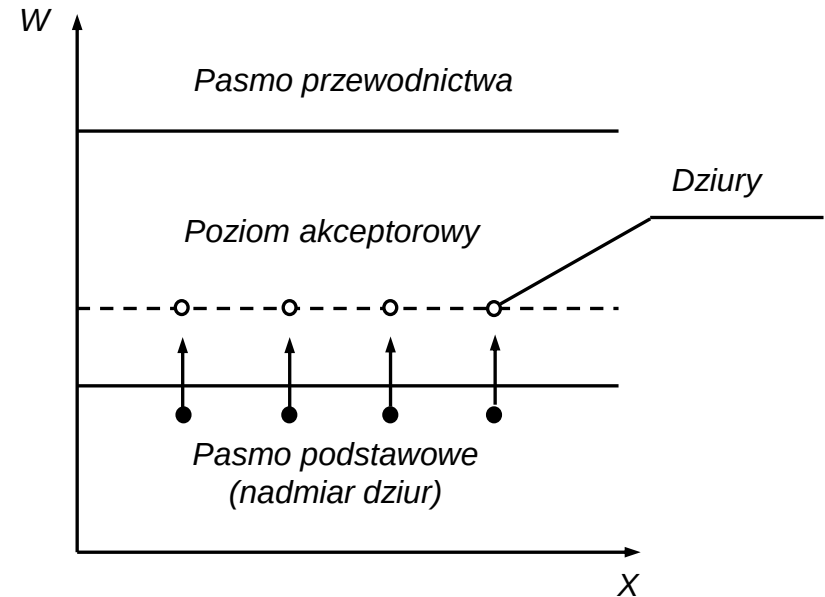
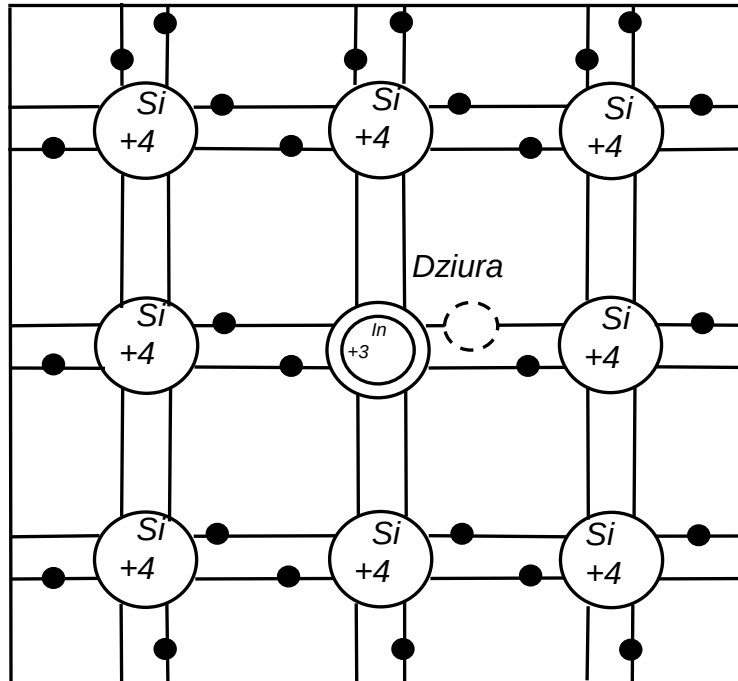


Półprzewodnik typu n uzyskuje się przez dodanie – w procesie wzrostu kryształu krzemu – domieszki pierwiastka pięciowartościowego (np. antymon Sb, arsen As lub fosfor P). Niektóre atomy krzemu zostaną zastąpione w sieci krystalicznej atomami domieszki, zwanymi **donorami**.



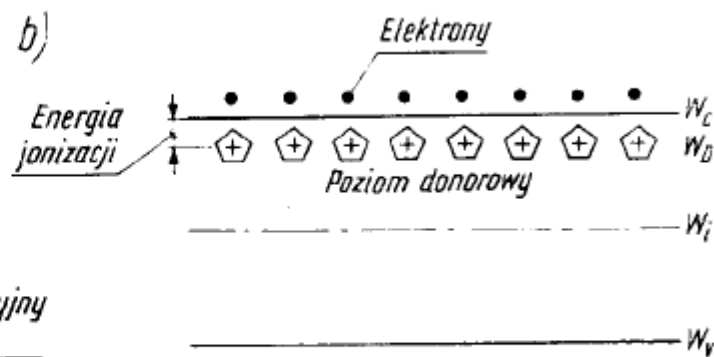
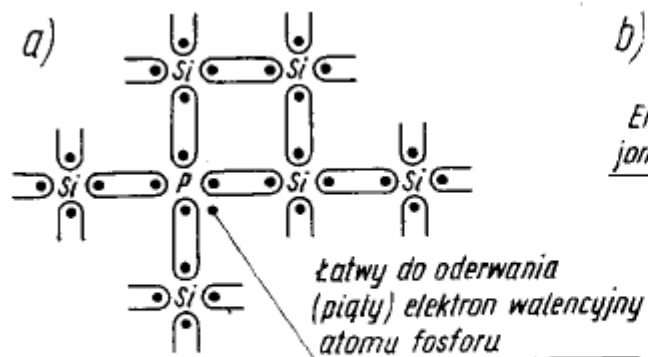
Każdy atom domieszki ma pięć elektronów walencyjnych, z których cztery są związane z sąsiednimi atomami krzemu. A piąty elektron jest wolny i może być łatwo oderwany od atomu domieszki – jonizując dodatnio. Elektron wówczas przechodzi do pasma przewodnictwa półprzewodnika. Atomy domieszki w modelu pasmowym półprzewodnika znajdują się na tzw. poziomie donorowym, który występuje w pobliżu dna pasma przewodnictwa półprzewodnika

Półprzewodnik typu p uzyskuje się przez zastąpienie niektórych atomów krzemu atomami pierwiastków trójwartościowych (np. glinu Al, galu Ga lub indu In). Na rysunku przedstawiono model sieci krystalicznej krzemu z domieszką atomów indu.

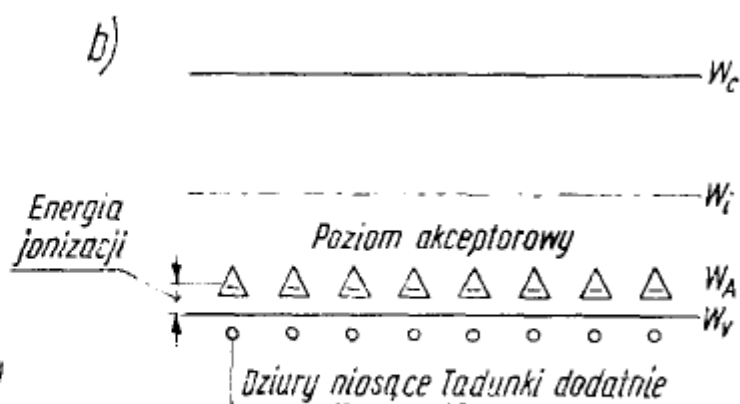
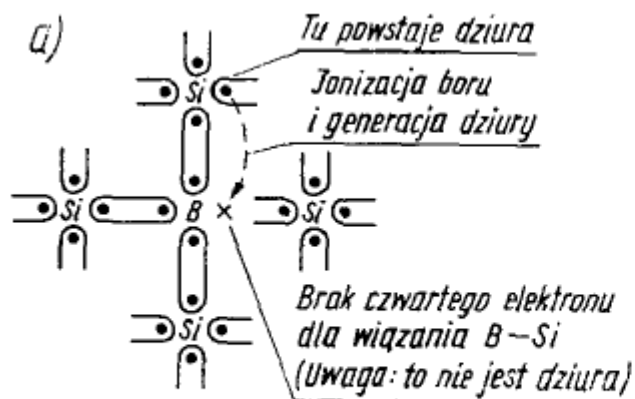


Atom tej domieszki ma trzy elektrony walencyjne, związane z sąsiednimi atomami krzemu. Do wypełnienia czwartego wiązania sąsiadującego krzemu, brakuje w sieci krystalicznej jednego elektronu i zostaje on uzupełniony przez pobranie elektronu z jednego z sąsiednich wiązań, w którym powstaje dziura. Atom pierwiastka trójwartościowego, zwanego **akceptorem**, po uzupełnieniu elektronu w „nieprawidłowym” wiązaniu (na skutek niedostatku ładunków dodatnich w jądrze) staje się jonem ujemnym, wywołując lokalną polaryzację kryształu.

Elektron ten przechodzi z pasma podstawowego półprzewodnika na poziom akceptorowy, jonizując tym samym ujemnie atom domieszki. Poziom akceptorowy znajduje się w pobliżu wierzchołka pasma podstawowego półprzewodnika



Półprzewodnik typu n.

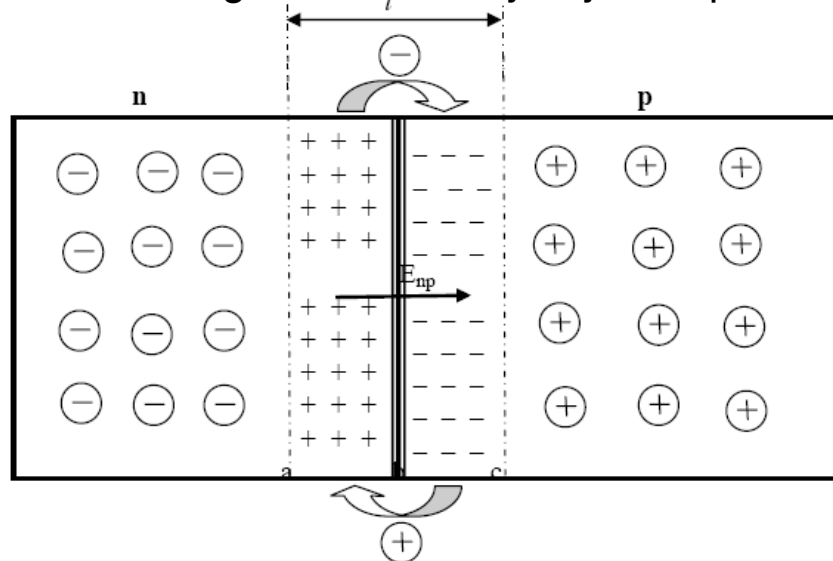


Półprzewodnik typu p.

Złącze p-n czyli dioda półprzewodnikowa

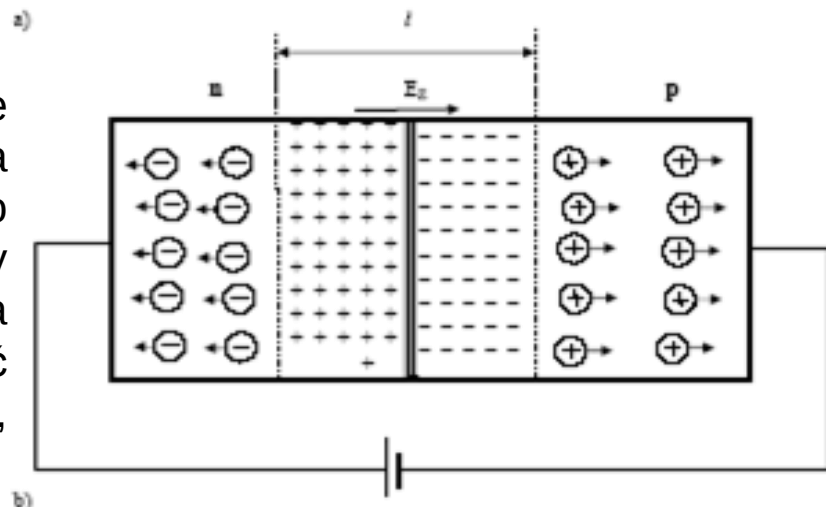
Dioda półprzewodnikowa powstaje przez zetknięcie dwóch półprzewodników o różnych rodzajach przewodności niesamoistnej. Granica zetknięcia półprzewodnika typu p z półprzewodnikiem typu n nosi nazwę złącza p-n. Szerokość złącza ma na ogół wymiar rzędu $10^{-7}...10^{-6}m$. Można je uzyskać w jednym kryształ, jeżeli wytworzyć w nim dzięki odpowiednim domieszkom równocześnie obszary o przewodności p i n. Złącza takie wytwarza się zwykle w czasie wzrostu (hodowania) kryształu lub metodami dyfuzji domieszek w podwyższonej temperaturze (np. do półprzewodnika zawierającego początkowo w całej objętości donory, wprowadzić do części próbki domieszki akceptorowe o koncentracji znacznie przekraczającej koncentrację donorów). Złącze p-n znajduje się na ogół w obudowie metalowej chroniącej go przed uszkodzeniami mechanicznymi i wpływami atmosferycznymi.

W obszarze złącza p-n elektrony przechodzą z półprzewodnika typu n do p, natomiast dziury w kierunku przeciwnym. Zjawisko to nazywamy dyfuzją nośników ładunku, a jego przyczyną jest różnica koncentracji nośników po obu stronach złącza. W ten sposób powstaje warstwa podwójna ładunku o grubości, / mniejszej niż $1\ \mu m$

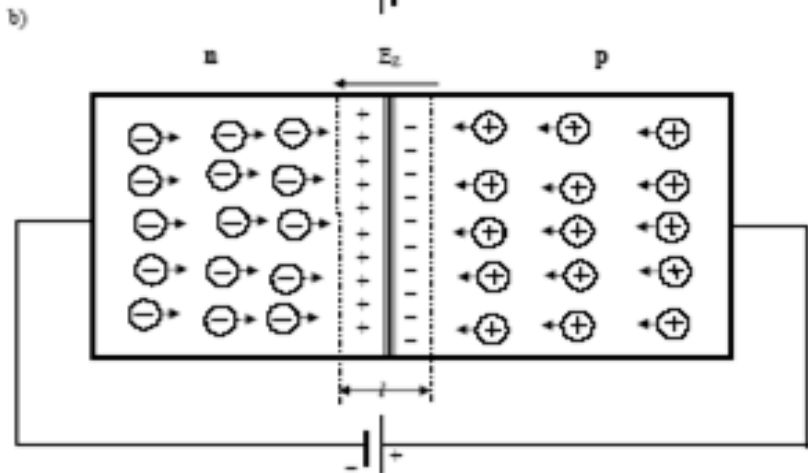


**Rozkład ładunku i nośników
w niespolaryzowanej diodzie
półprzewodnikowej n-p
– swobodne nośniki ładunku.**

Jeżeli do złącza p-n przyłożyć zewnętrzne pole elektryczne E_z w kierunku zgodnym z kierunkiem pola E_{np} (do półprzewodnika typu n – biegun dodatni, a do typu p – biegun ujemny) (rys.a), to grubość warstwy zaporowej wzrośnie. W wyniku tego rezystancja złącza znacznie wzrośnie i będzie przez niego płynąć stosunkowo słaby prąd. Nosi on nazwę zaporowego, a jego kierunek przepływu – kierunku zaporowego.



Jeżeli do złącza p-n przyłożyć zewnętrzne pole elektryczne E_z w kierunku przeciwnym do wewnętrznego pola złącza E_{np} (do typu n – biegun ujemny, a do typu p – biegun dodatni) (rys.b), to zmniejsza się grubość warstwy zaporowej i jej rezystancja. Przy takiej polaryzacji przez diodę może płynąć prąd o dużym natężeniu, a jego kierunek nazywamy kierunkiem przewodzenia. Natężenie prądu I płynącego przez złącze p - n pod wpływem przyłożonego z zewnątrz napięcie U_D wyraża się następującym wzorem



Spolaryzowana dioda n–p:
a) w kierunku zaporowym,
b) w kierunku przewodzenia.

$$I = I_s (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad \text{gdzie} \quad U_T = \frac{kT}{e} \cong 26\text{mV} \quad \text{przy} \quad T = 300\text{K}$$

W miarę zwiększania napięcia zewnętrznego prąd dyfuzyjny staje się coraz większy, osiągając bardzo duże wartości gdy wartość napięcia zewnętrznego zbliża się do wartości około 0,7 V, dla złącza krzemowego.

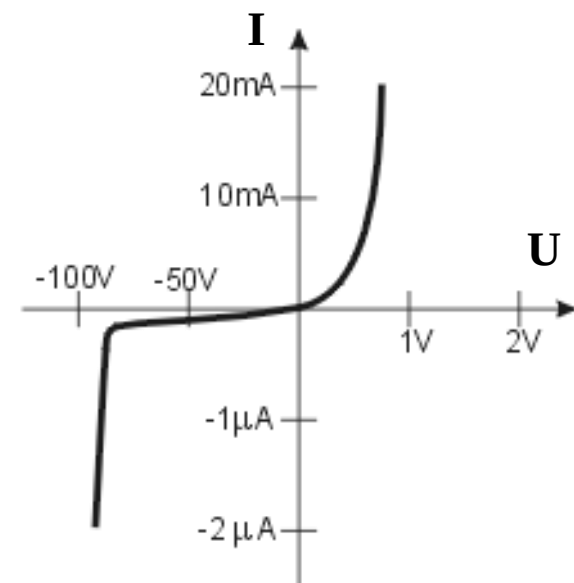
W diodach wyprowadzenie polaryzowane dodatnio dla pracy w kierunku przewodzenia nazywa się anodą A, a drugą końcówkę, polaryzowaną ujemnie, katodą K. Strzałka w symbolu diody wskazuje kierunek przepływu prądu przewodzenia.



Charakterystyka diody zgodnie ze zjawiskami występującymi w złączu PN kształtuje się jak na rysunku.

Dla przykładu, jeśli diodę włączono w obwód prądu stałego tak, że wartość prądu płynącego od anody do katody jest równa 10 mA, wówczas (jak widać z wykresu) spadek napięcia na przewodzącej diodzie będzie wynosił 0,5 V. Prąd płynący w kierunku zaporowym, wynoszący dla diod uniwersalnych kilka nanoamperów jest pomijalny, dopóki nie przekroczy się napięcia przebicia. Zakres takiej pracy jest wykorzystywany w diodach Zenera.

W diodach często dla uproszczenia pomijany jest też spadek napięcia na przewodzącej diodzie i dioda może być traktowana jako dobre przybliżenie idealnego elementu przewodzącego prąd tylko w jednym kierunku. Spadek napięcia wynosi dla diod krzemowych od 0,5 do 0,8 V i warto o nim pamiętać, szczególnie podczas dobierania napięć w układach zasilających.

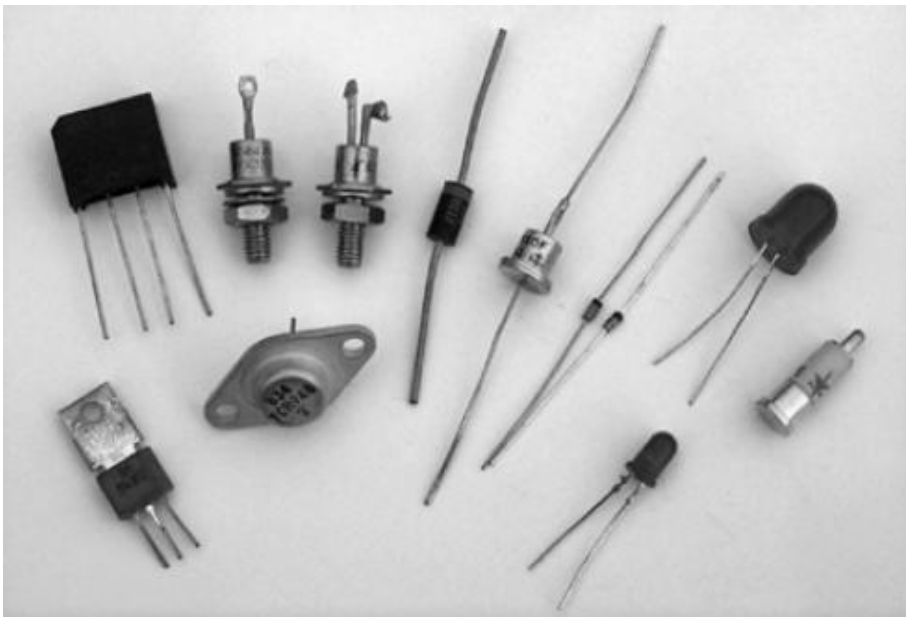
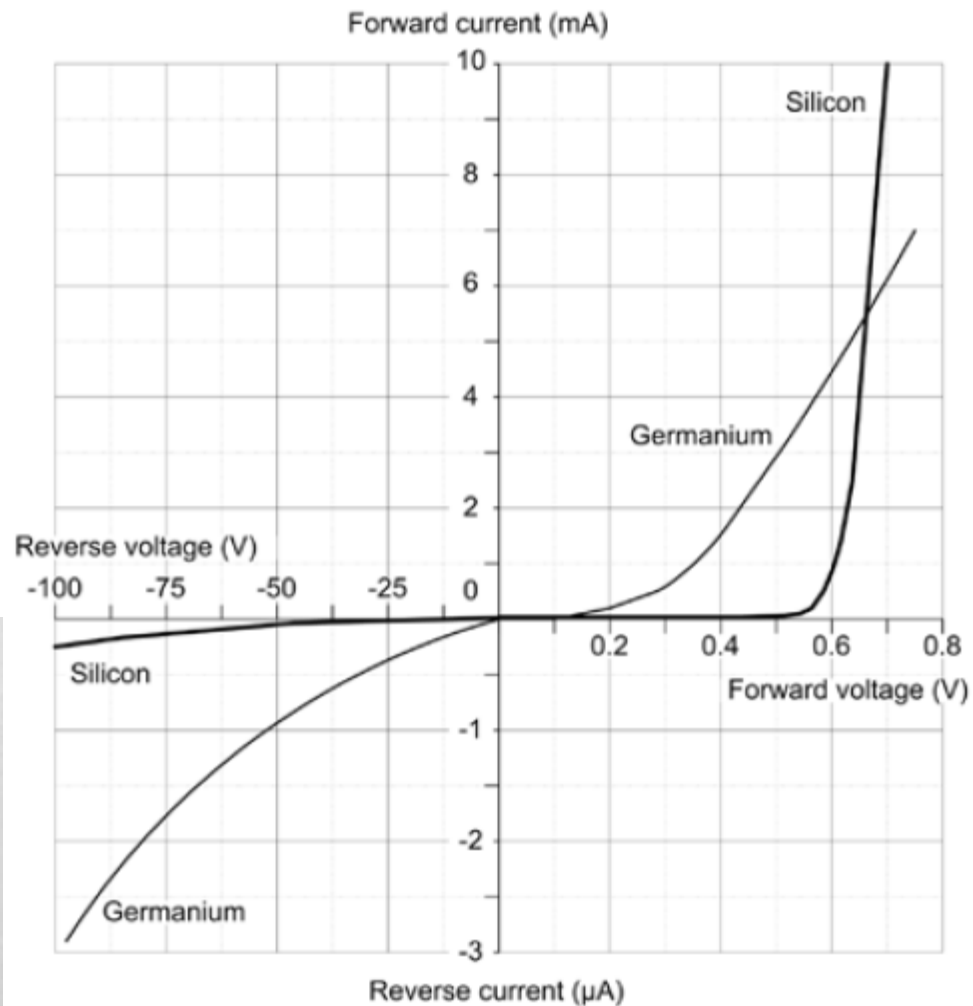
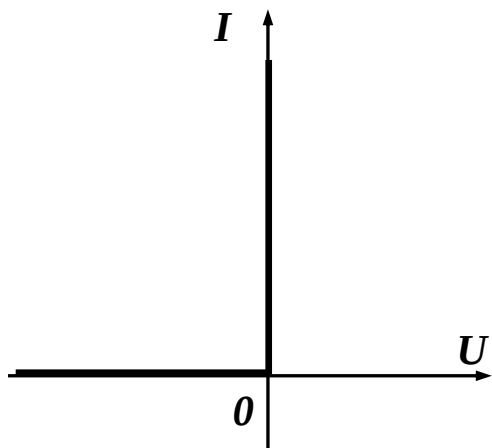


Przy polaryzacji złącza PN w kierunku zaporowym napięciem większym niż pewna charakterystyczna dla danego złącza wartość napięcia nazywana napięciem przebicia, następuje raptowny wzrost prądu płynącego przez złącze. Zjawisko to nosi nazwę przebicia złącza. Wyróżnia się dwa mechanizmy przebicia złącza: przebicie Zenera i przebicie lawinowe. Przebicie Zenera wiąże się z jonizacją elektrostatyczną atomów w sieci krystalicznej, natomiast przebicie lawinowe, z jonizacją zderzeniową. Zjawiska przebicia złącza nie należy bezpośrednio wiązać z jego zniszczeniem. Jeżeli prąd wsteczny złącza jest odpowiednio ograniczony, to złącze dowolnie długo może pracować w zakresie przebicia. Dopiero zbyt duży prąd wsteczny, powodując nadmierne wydzielanie ciepła, może zniszczyć złącze. Zniszczenie cieplne złącza może spowodować również zbyt duży prąd przewodzenia. W obu przypadkach wiąże się to z przekroczeniem dopuszczalnej mocy strat złącza.

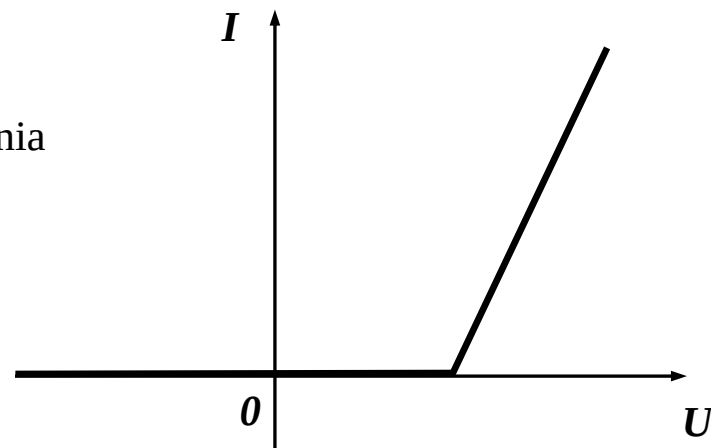
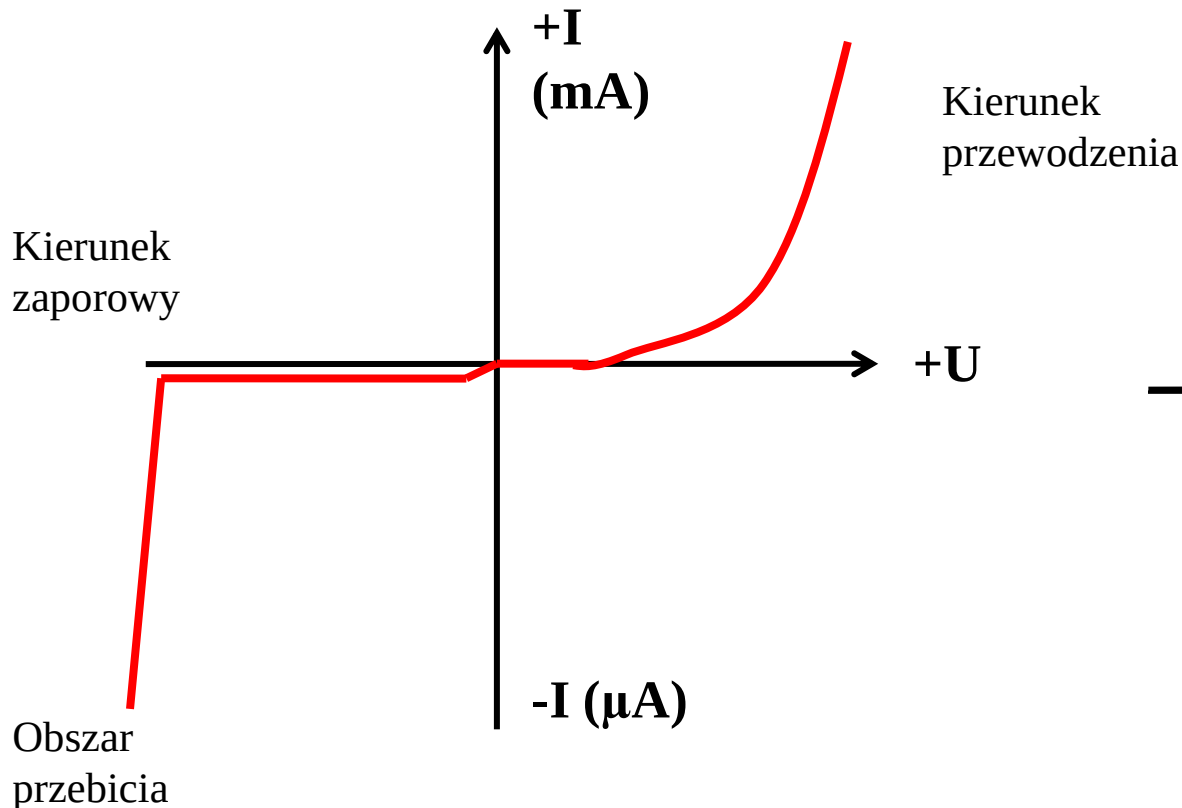
Diody klasyfikujemy ze względu na:

- materiał
 - krzemowe
 - germanowe
- konstrukcję
 - ostrzowe i warstwowe
 - stopowe i dyfuzyjne
 - mesa
 - planarne i epiplanarne
- strukturę fizyczną złącza
 - *p-n*
 - MS
 - *Heterozłącza*
- zastosowanie
 - prostownicze
 - uniwersalne
 - impulsowe
 - stabilizatory – Zenera
 - pojemnościowe – varikap i varaktory
 - tunelowe
 - mikrofalowe: detekcyjne i mieszające
 - fotodiody
 - diody elektroluminescencyjne
- przebiegające zjawiska
 - Zenera
 - Gunna
 - lawinowe
 - tunelowe

Charakterystyka idealnego klucza a charakterystyka diody



Charakterystyka diody

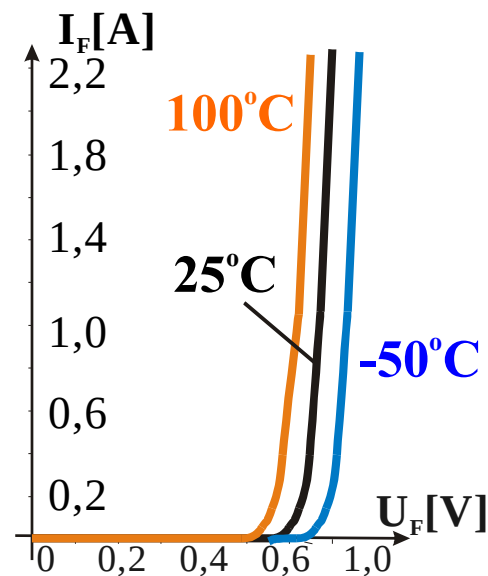


Parametry charakteryzujące diody prostownicze

- napięcie przewodzenia – U_F , przy określonym prądzie przewodzenia,
- prąd wsteczny – I_R , przy określonym napięciu w kierunku zaporowym,
- czas ustalania się prądu wstecznego – t ,
- pojemność – C , przy określonym napięciu przewodzenia.

Dopuszczalne (graniczne) parametry:

- maksymalny prąd przewodzenia – I_0
- szczytowe napięcie wsteczne – U_{RWM}



Charakterystyki przewodzenia diody pn dla różnych temperatur