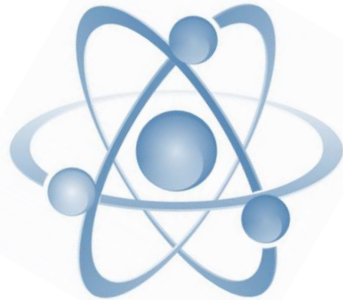




Półprzewodniki

Dr hab. Maciej Czapkiewicz
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321
czapkiew@agh.edu.pl
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Fizyka>

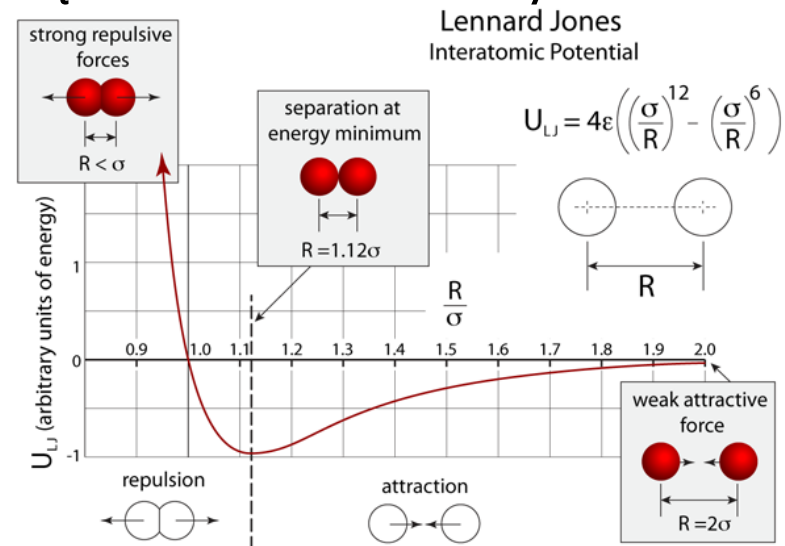


- Elektrony to fermiony, obsadzają poziom energetyczne zgodnie ze statystyką Fermiego-Diraca, dla $T=0$ obsadzają wszystkie energie aż do energii Fermiego E_F .
- Rozwiązanie równania Schroedingera dla elektronu w polu elektrycznym jądra atomu daje skwantowane energie.
- Rozwiązanie równania Schroedingera dla elektronu w periodycznym polu sieci krystalicznej daje ciągłe obszary dozwolonej energii (pasma przewodnictwa) i niedozwolonej energii (pasma wzbronione).
- Jeśli energia Fermiego E_F znajduje się w obszarze pasma przewodnictwa, materiał jest przewodnikiem.
- Jeśli E_F znajduje się w obszarze pasma wzbronionego, materiał jest izolatorem (duża szerokość pasma wzbronionego) lub półprzewodnikiem samoistnym (mała szerokość).

Wiązania atomowe



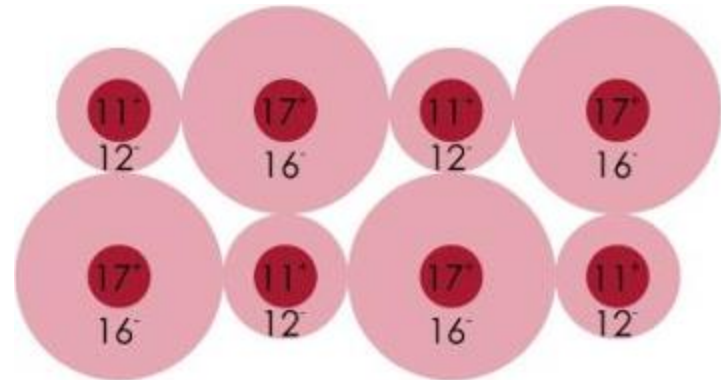
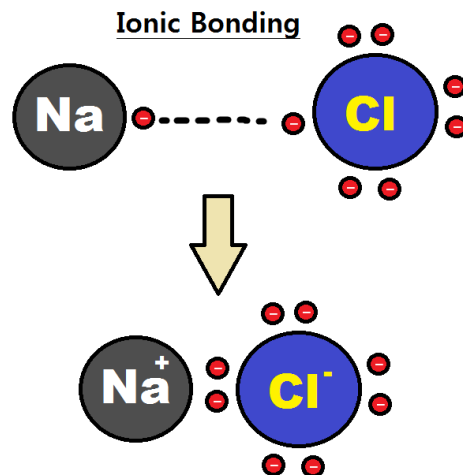
- Wiązania tworzą się tak, aby obydwa atomy dążyły do oktetu elektronowego, oddając, przyjmując lub wspólniając elektrony.
- Nawet w przypadku gazów szlachetnych, atomy przyciągają się (oddziaływanie van der Waalsa). Jest to słabe oddziaływanie, widoczne w bardzo niskich temperaturach.
- Odległość R między atomami jest zdeterminowana równowagą między dipolowym oddziaływaniem elektrostatycznym i zakazem Pauliego wskutek przekrywania się orbitali elektronowych.
- Potencjał Lenarda-Jonesa:





Wiązania atomowe w ciałach stałych

- Wiązania tworzą się tak, aby obydwa atomy dążyły do oktetu elektronowego, oddając, przyjmując lub wspólniając elektrony z zewnętrznych powłok.
- Wiązanie jonowe: jeden atom (np. Na) oddaje elektron drugiemu atomowi (np. Cl). Bardzo silne wiązanie, brak elektronów swobodnych, światło przechodzi.

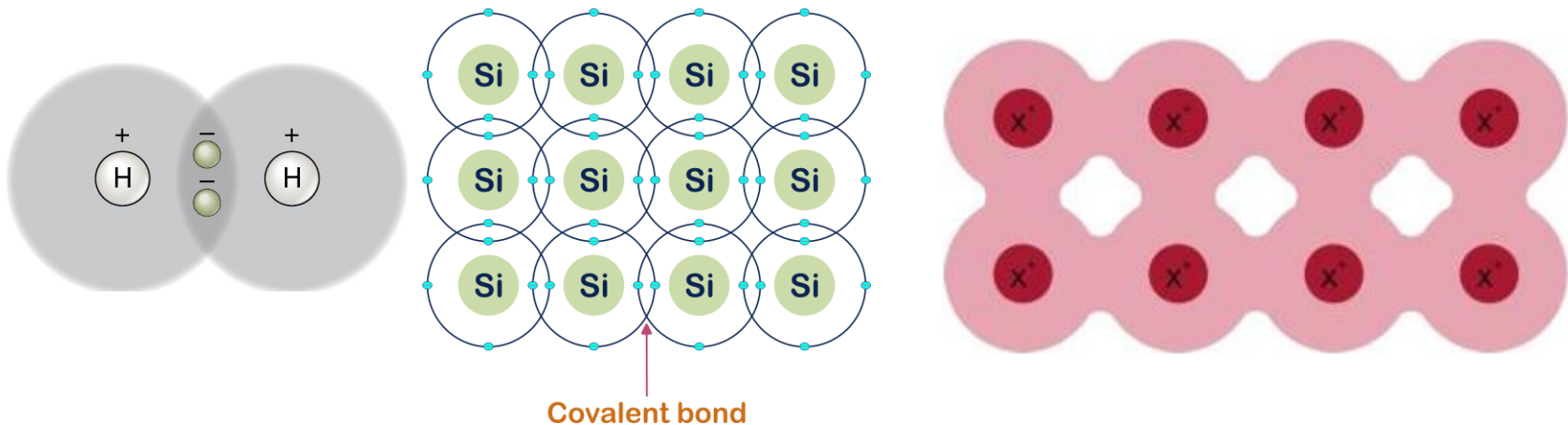


<https://home.agh.edu.pl/~zajuszm/fizyka-cia-a-sta-ego.html>



Wiązania atomowe w ciałach stałych

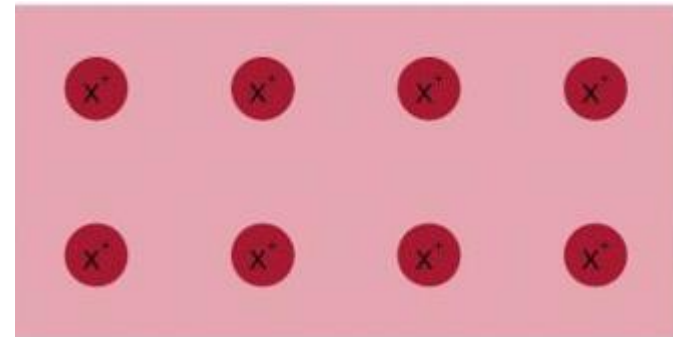
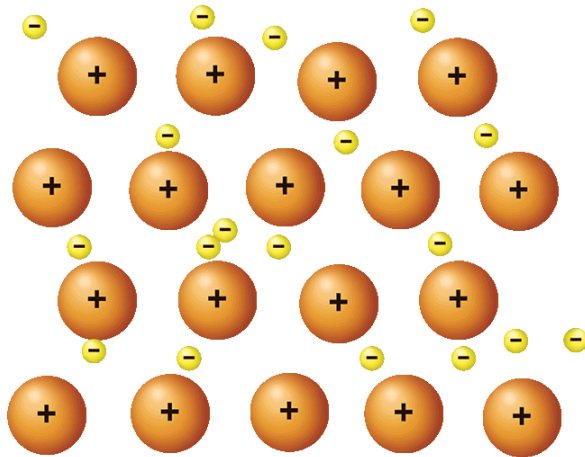
- Wiązania tworzą się tak, aby obydwa atomy dążyły do oktetu elektronowego, oddając, przyjmując lub współniając elektrony z zewnętrznych powłok.
- Wiązanie kowalencyjne: sąsiednie atomy (np. C, Si) współniają swoje elektrony. Bardzo silne wiązanie, brak elektronów swobodnych w $T=0$, światło przechodzi.



Wiązania atomowe w ciałach stałych



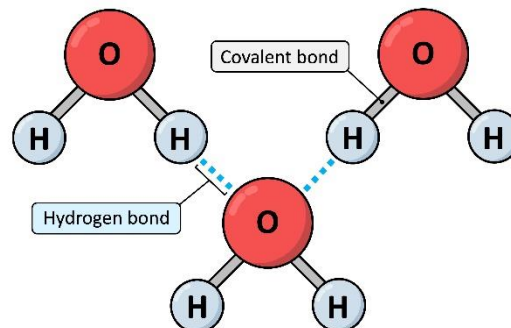
- Wiązania tworzą się tak, aby obydwa atomy dążyły do oktetu elektronowego, oddając, przyjmując lub wspólniając elektrony z zewnętrznych powłok.
- Wiązanie metaliczne – elektrony są współniane dla całej sieci, średnio silne wiązanie, bardzo dobre przewodnictwo elektryczne i ciepłe, światło jest odbijane.



Wiązania atomowe, podsumowanie



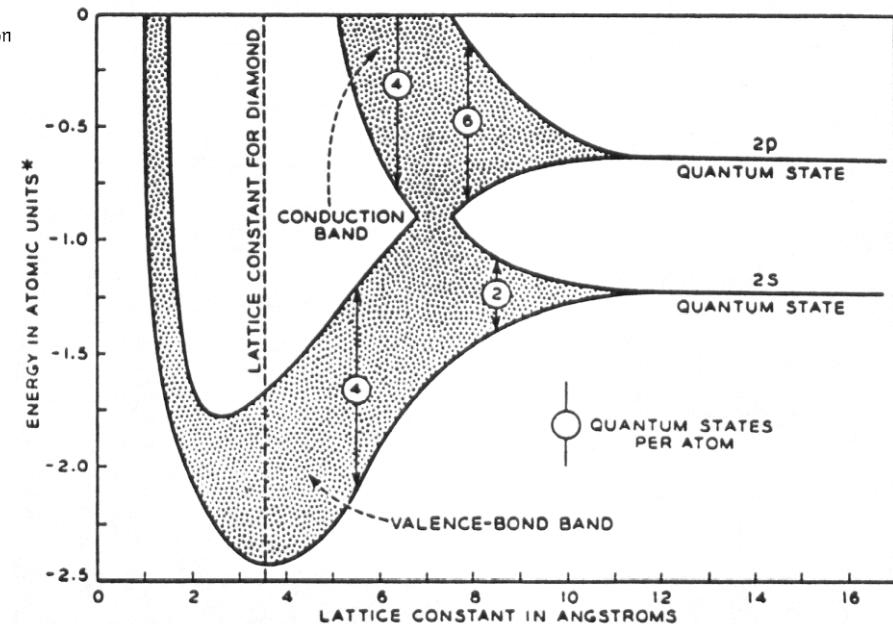
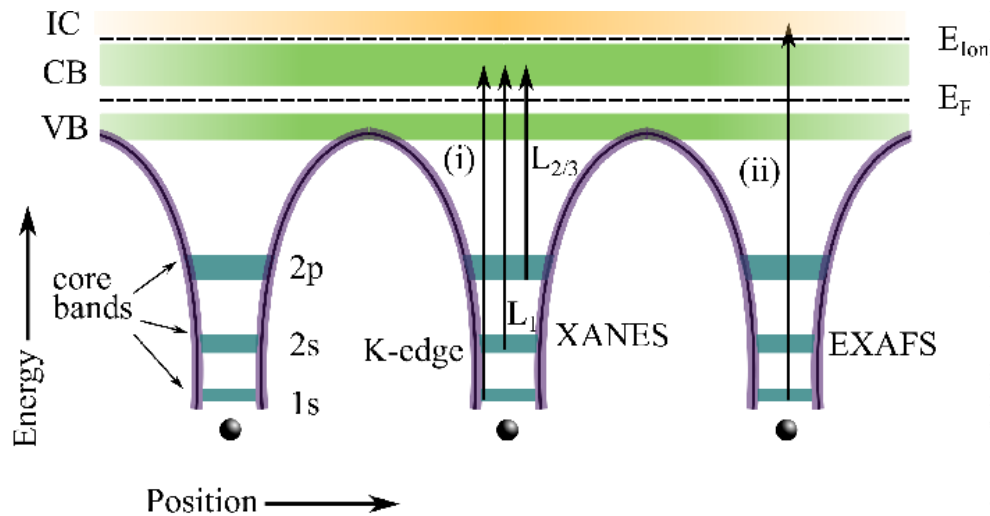
- Wiązania jonowe (np. kryształ NaCl).
- Wiązanie kowalencyjne (np. cząsteczki wodoru, tlenu, wody, kryształ Si)
- Wiązanie metaliczne (kryształy metali).
- Oddziaływanie Van der Waalsa – skraplanie gazów szlachetnych lub gazów niepolarnych cząsteczek.
- Wiązanie wodorowe – elektrostatyczne oddziaływanie wodoru związanego kowalencyjnie np. z tlenem, z innym atomem sąsiedniej cząsteczki (np. wiązania między cząsteczkami H_2O w lodzie), słabe wiązanie ale mocniejsze niż van der Waalsa.



Sieć krystaliczna



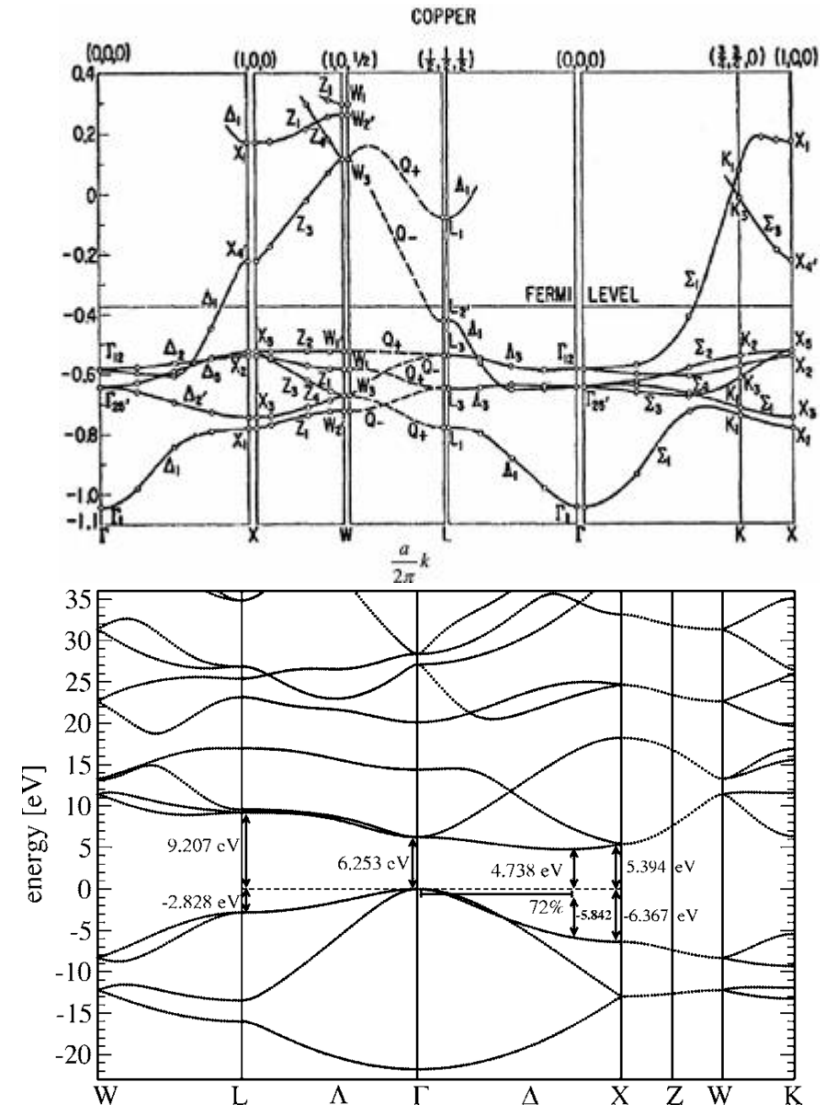
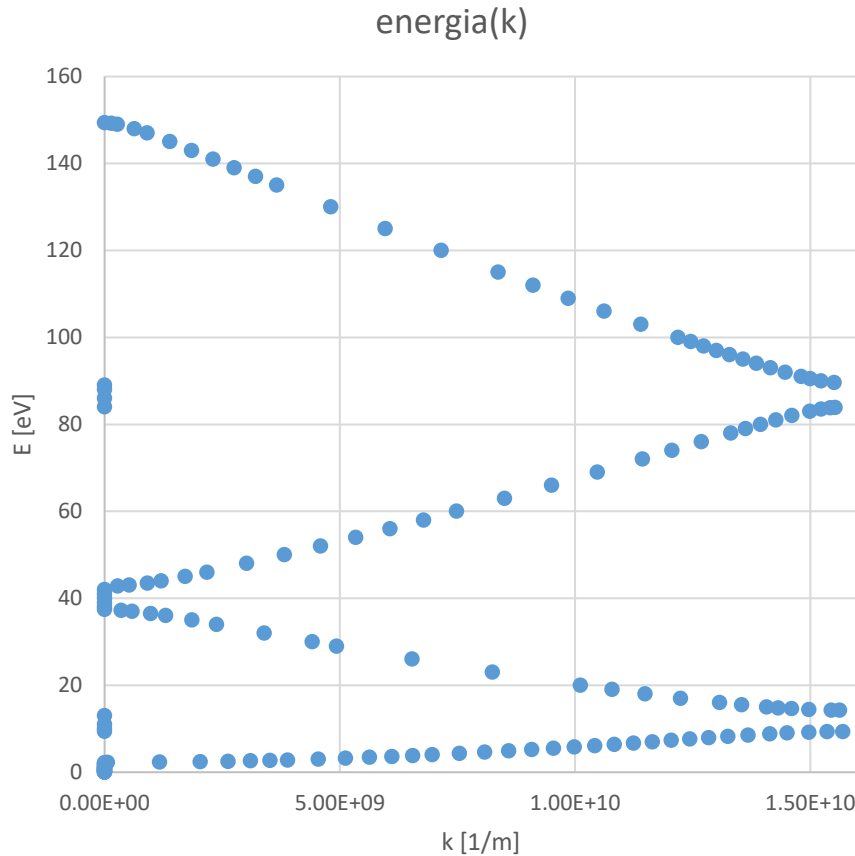
- Przy zbliżaniu do siebie atomów, poziomy energetyczne zlewają się w pasma.



Struktura pasmowa



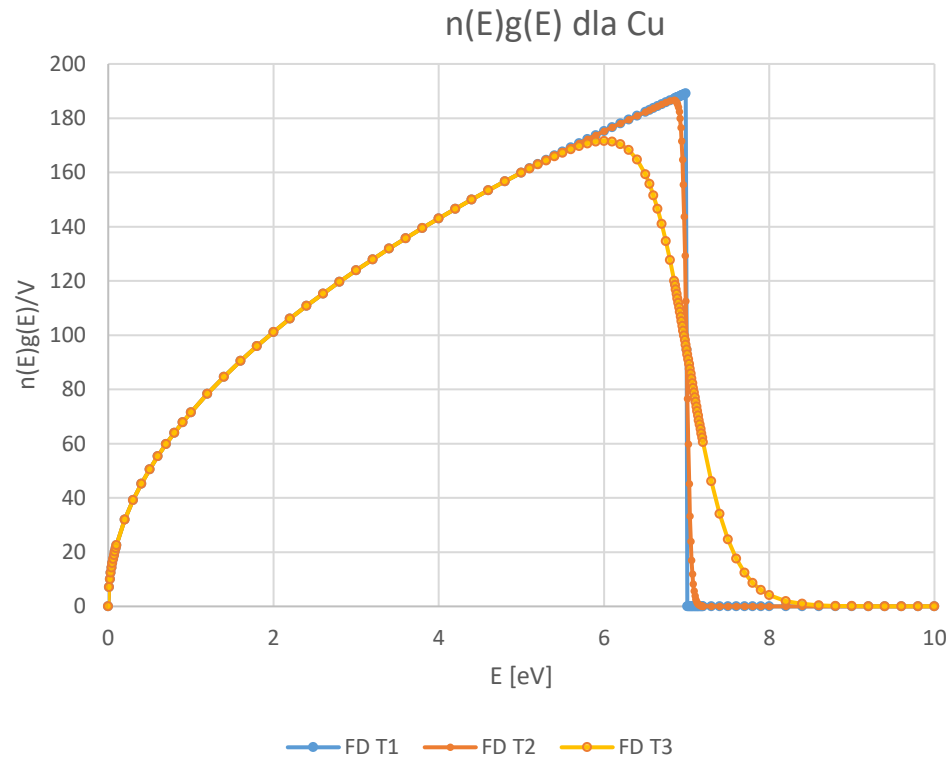
➤ 1D Model Kroeniga-Penneya rzeczywiste struktury pasmowe



Gęstość stanów energetycznych dla miedzi



- W temperaturze 1K, 300K i 3000 K

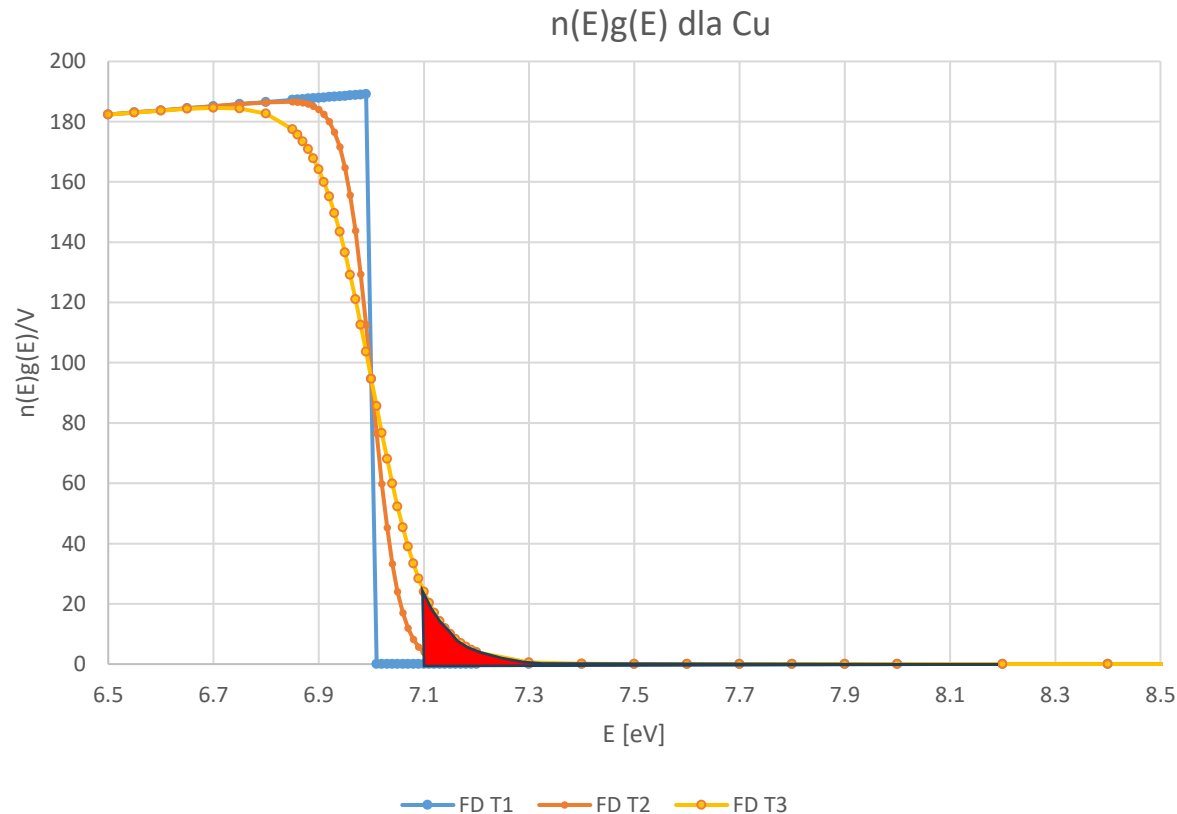


$$dN = g(E)n(E)dE = \frac{V}{2\pi^2} \sqrt{\left(\frac{8m}{\hbar^2}\right)^3 E} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)} + 1} dE$$

Temperaturowe rozmycie obsadzeń wokół E_f



- W temperaturze 300K, 0.1 eV powyżej E_f , 0.084% stanów, w 600K: 1.06%
- w temperaturze 600 K, 0.2eV powyżej E_f : tylko 0.007% stanów

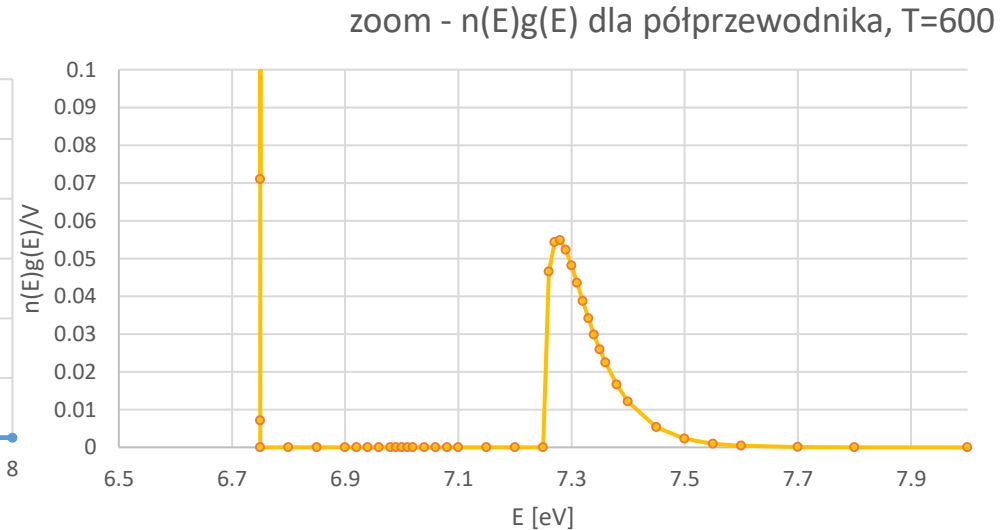
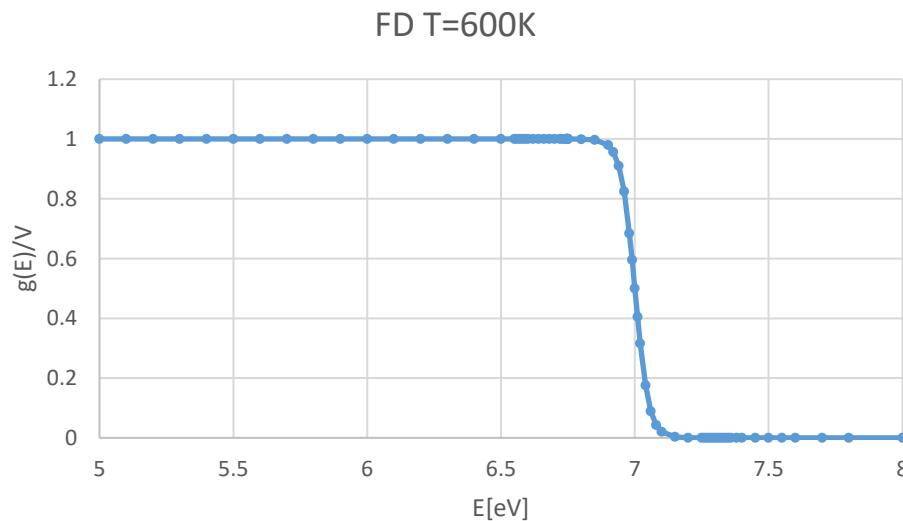
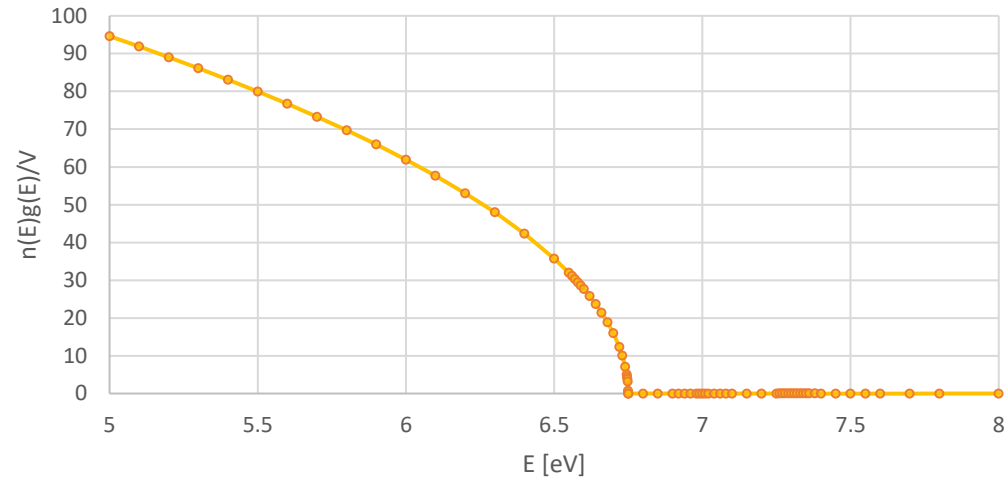
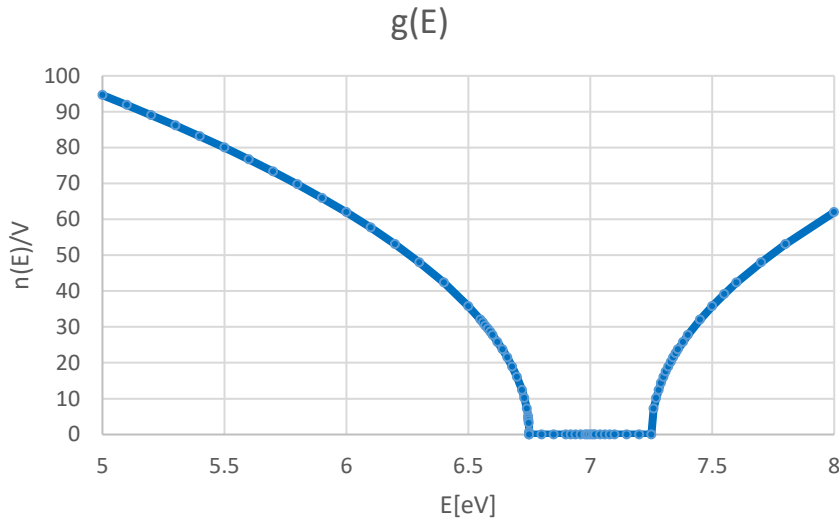


Obsadzenia stanów w półprzewodniku



➤ Przykład: przerwa wzbroniona od 6.75 eV do 7.25 eV, $E_f = 7\text{ eV}$

$n(E)g(E)$ dla półprzewodnika, $T=600$



Temperaturowe rozmycie obsadzeń wokół E_f



- Rozkład Fermiego-Diraca można przybliżyć rozkładem Boltzmann'a wokół E_f

$$n(E) = \frac{1}{e^{((E-E_f)/kT)} - 1} \approx \frac{1}{e^{((E-E_f)/kT)}} = e^{((E_f-E)/kT)}$$

- Zakładając, że E_f znajduje się w połowie przerwy wzbronionej o szerokości ΔE_g (izolator lub niedomieszkowany półprzewodnik), wtedy stosunek ilości elektronów w paśmie przewodnictwa, do ilości wszystkich obsadzonych stanów, wynosi w przybliżeniu:

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \left(\sqrt{\frac{kT}{E_f}} \right)^3 e^{((- \Delta E_g)/2kT)}$$

- Zadanie: ile wynosi ten stosunek, dla $T=300\text{K}$, w przypadku półprzewodnika $\Delta E_g = 0.5 \text{ eV}$ i izolatora $\Delta E_g = 5 \text{ eV}$

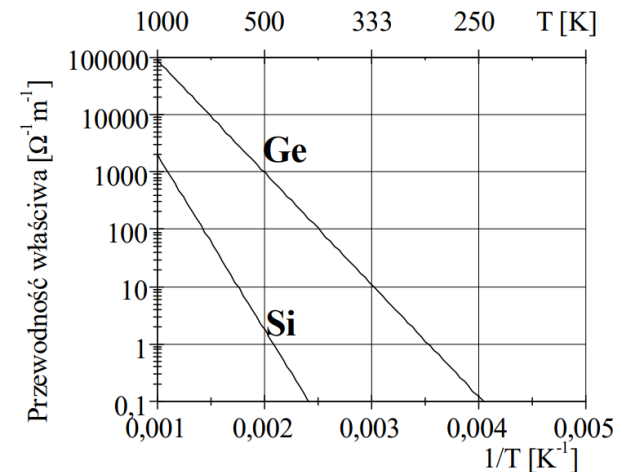
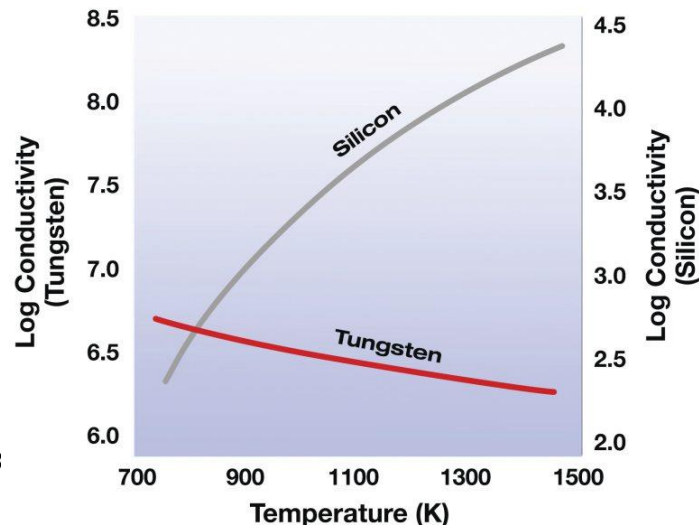
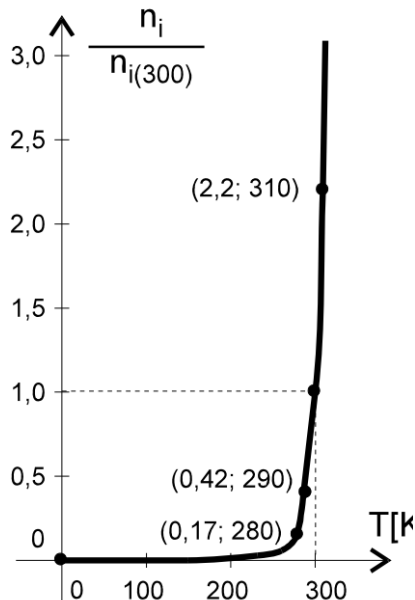
Temperaturowa zależność rezystancji



- Przewodność zależy od koncentracji nośników i ich ruchliwości

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu$$

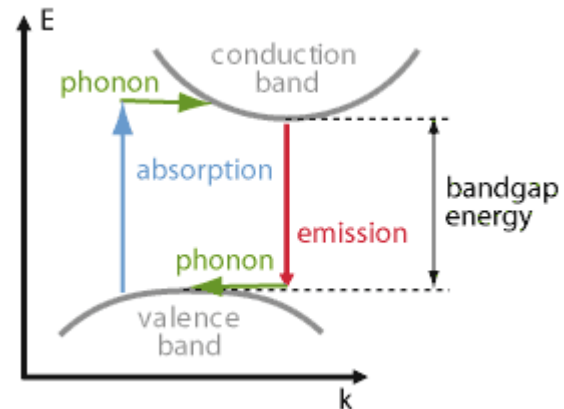
- Koncentracja nośników w paśmie przewodzenia, dla półprzewodników, silnie rośnie z temperaturą, a ruchliwość bardzo słabo maleje. Dlatego przewodność, w przybliżeniu, rośnie z temperaturą (czyli rezystywność maleje):



Szerokość przerwy energetycznej



- Energia Fermiego w połowie przerwy energetycznej w izolatorach i półprzewodnikach samoistnych
- Różnica między izolatorami a półprzewodnikami jest tylko ilościowa – szerokość przerwy energetycznej w izolatorach jest na tyle duża, że ilość elektronów w paśmie przewodnictwa, wskutek rozmycia termicznego, jest znikoma.
- Oprócz wzbudzenia termicznego, elektrony do pasma przewodnictwa mogą zostać przeniesione wskutek oddziaływania z promieniowaniem E-M o energii większej lub równej przerwie energetycznej. Elektron powracający do pasma walencyjnego wypromieniowuje falę E-M o energii równej przerwie energetycznej.

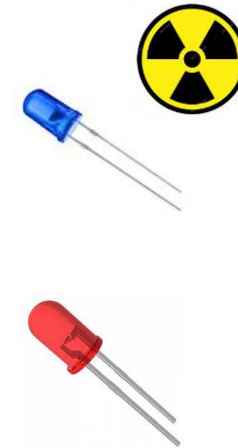


Szerokość przerwy energetycznej



- Energia Fermiego w połowie przerwy energetycznej w izolatorach i półprzewodnikach samoistnych

materiał	symbol	deltaE [eV]	Przewodność 1/Ωm
diamant	C	5,5	$\sim 10^{-13}$
siarczek cynku	ZnS	3,6	
azotek galu	GaN	3,4	
węglik krzemu	SiC	2,86	$10^{-0} \dots 10^{-7}$
siarczek kadmu	CdS	2,42	
fosforek galu	GaP	2,26	
arsenek galu	GaAs	1,43	
fosforek indu	InP	1,35	
krzem	Si	1,11	$4.5 \cdot 10^{-4}$
german	Ge	0,67	2.17
arsenek indu	InAs	0,36	
selenek ołowiu	PbSe	0,27	
miedź	Cu	brak	$6 \cdot 10^7$

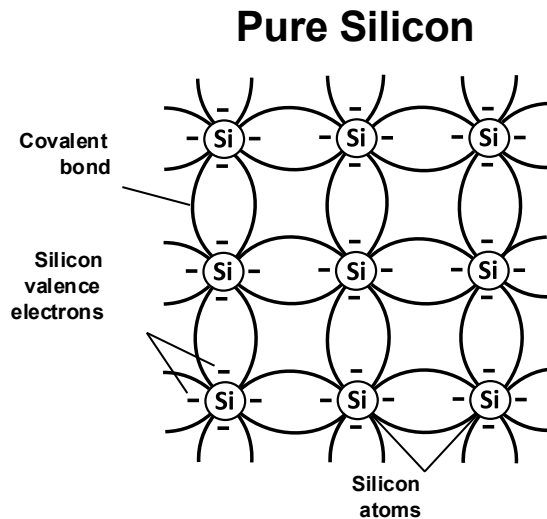


Półprzewodniki domieszkowane

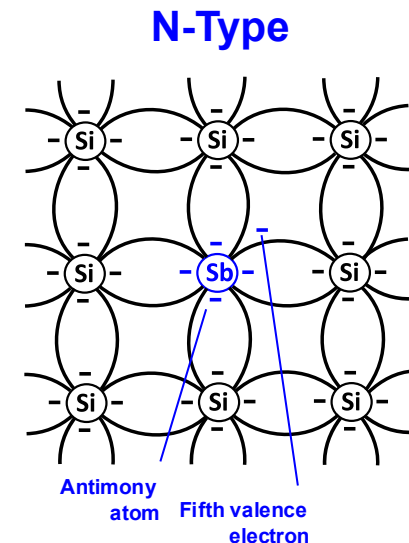
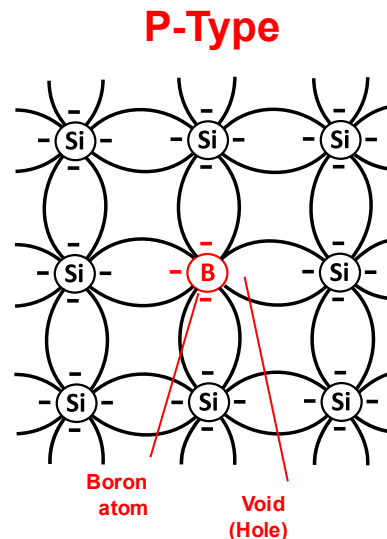


- Domieszkowanie polega na umieszczeniu w sieci krystalicznej półprzewodnika obcych atomów o innej wartościowości, takie defekty tworzą nadmiarowy elektron - domieszki donorowe n, lub brak elektronu (dziurę) – domieszki akceptorowe p

Intrinsic (Undoped)



Extrinsic (Doped)

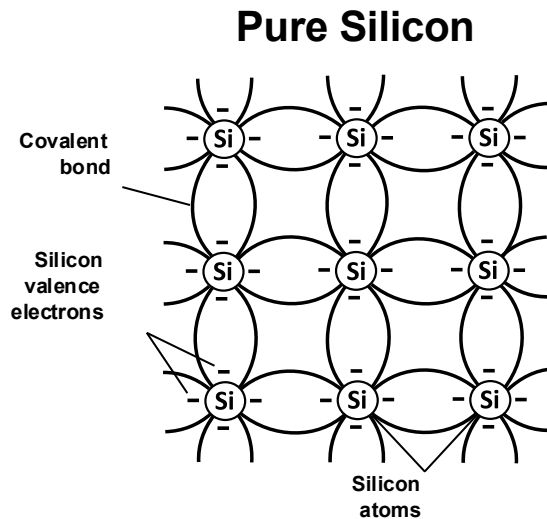


Półprzewodniki domieszkowane

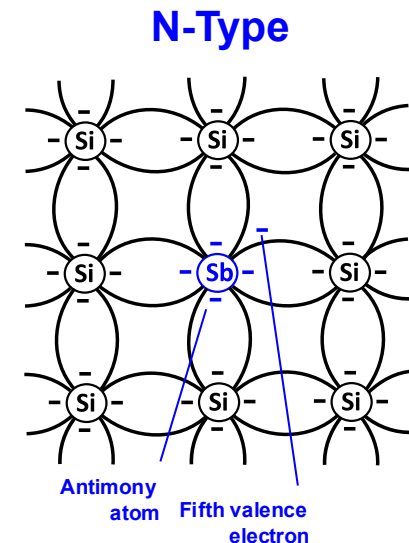
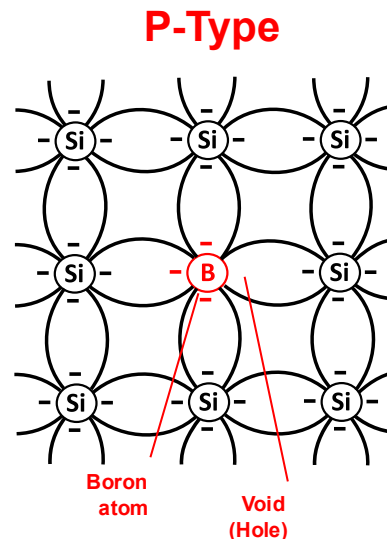


- Domieszki donorowe n: P, As, Sb, Bi
- Domieszki akceptorowe p: B, Al, Ga, In
- Nawet niewielka ilość domieszek istotnie zwiększa ilość nośników

Intrinsic (Undoped)



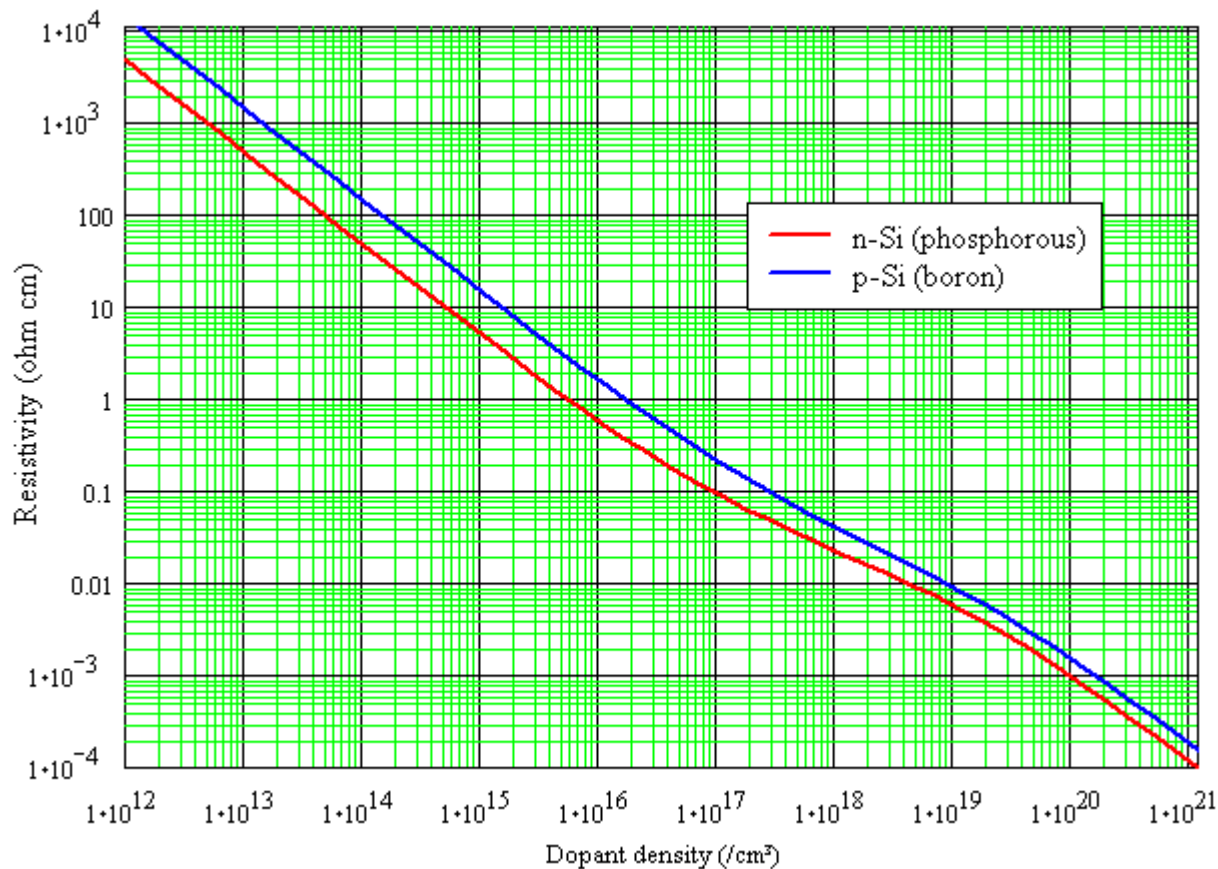
Extrinsic (Doped)



Półprzewodniki domieszkowane



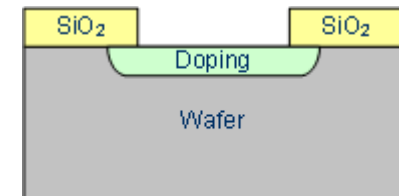
- Nawet niewielka ilość domieszek istotnie zwiększa ilość nośników, a więc także przewodność. Silne domieszkowanie zapewnia przewodność prawie jak dla metalu.



Półprzewodniki domieszkowane



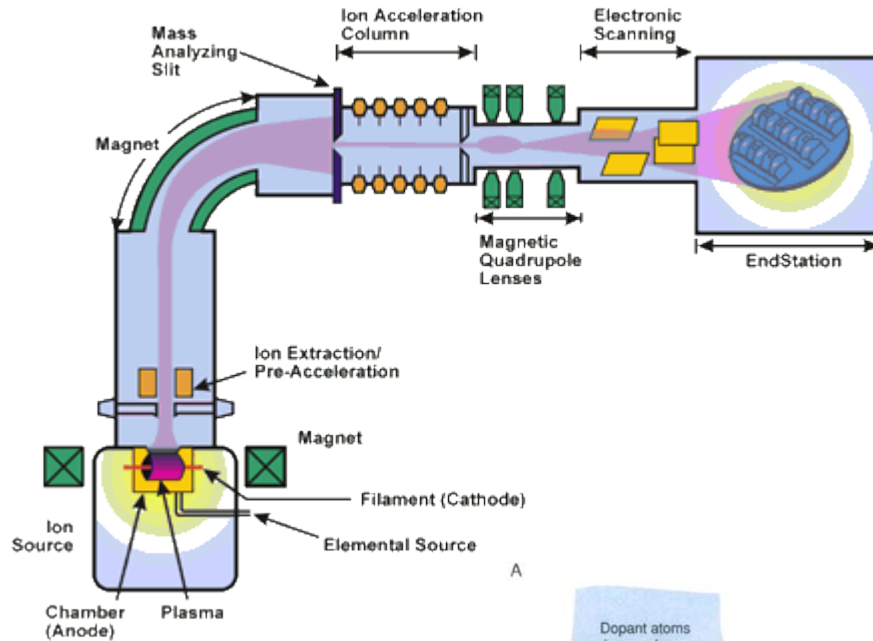
- J.R.Woodyard, 1950 – patent z domieszkowaniem germanu,
- G.Teal, M. Sparks, 1953 – podobny patent
- Sposoby domieszkowania:
 - w czasie wzrostu kryształu, lub w post-procesingu:
 - ✓ przez dyfuzję w wysokiej temperaturze
 - ✓ przez implantację jonową
 - ✓ przez napromieniowanie neutronami (transmutacja)
- Domieszkowanie w post-procesingu umożliwia zastosowanie maski w celu lokalnego domieszkowania



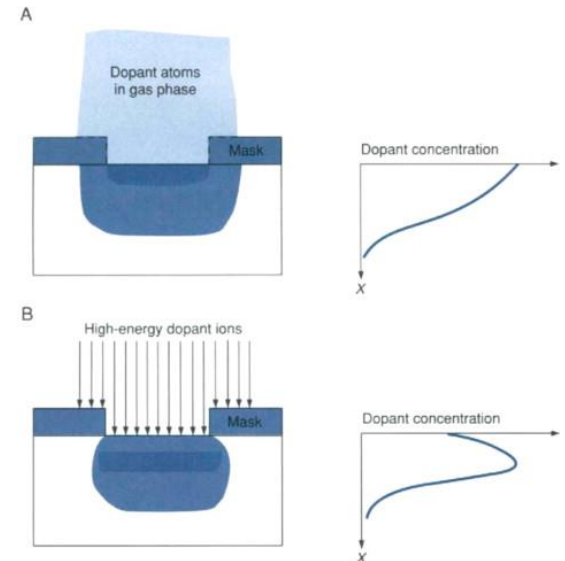
Półprzewodniki domieszkowane



➤ Implantacja jonowa:



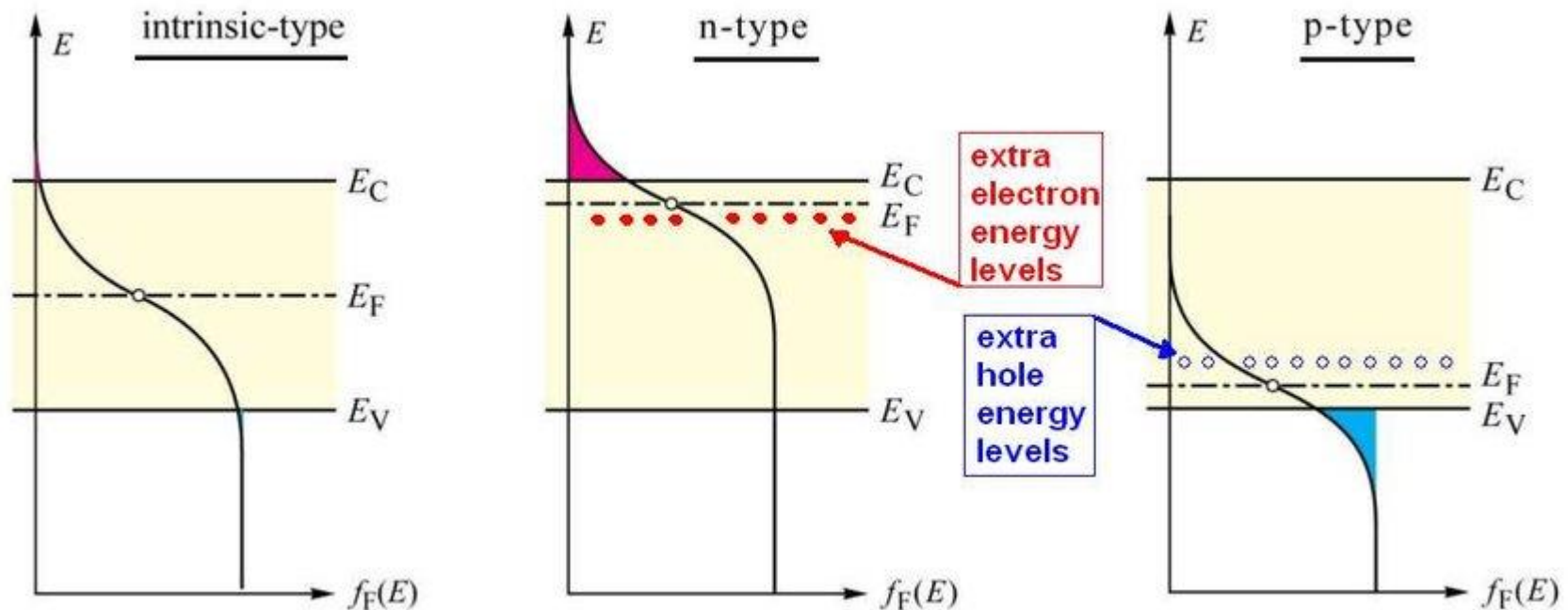
➤ Różnica w domieszkowaniu dyfuzyjnym a jonowym:





Energia Fermiego vs domieszki

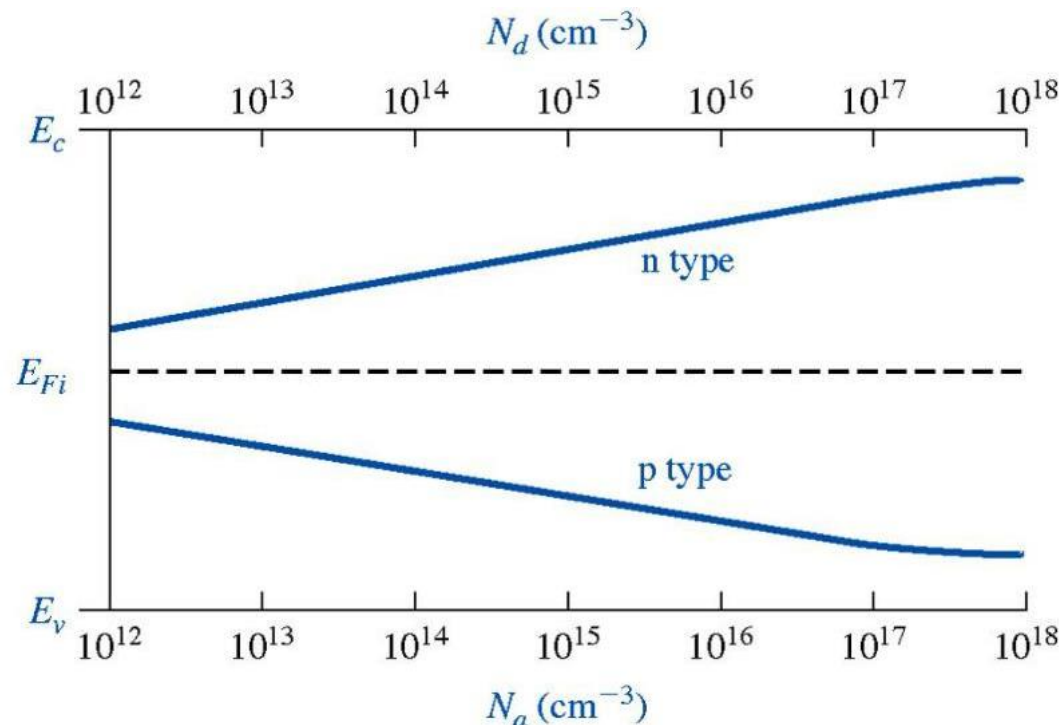
- Domieszki n przesuwają energię Fermiego ze środka przerwy wzbronionej w kierunku pasma przewodnictwa.
- Domieszki p przesuwają energię Fermiego ze środka przerwy wzbronionej w kierunku pasma walencyjnego.





Energia Fermiego vs domieszki

- Domieszki n przesuwają energię Fermiego ze środka przerwy wzbronionej w kierunku pasma przewodnictwa.
- Domieszki p przesuwają energię Fermiego ze środka przerwy wzbronionej w kierunku pasma walencyjnego.

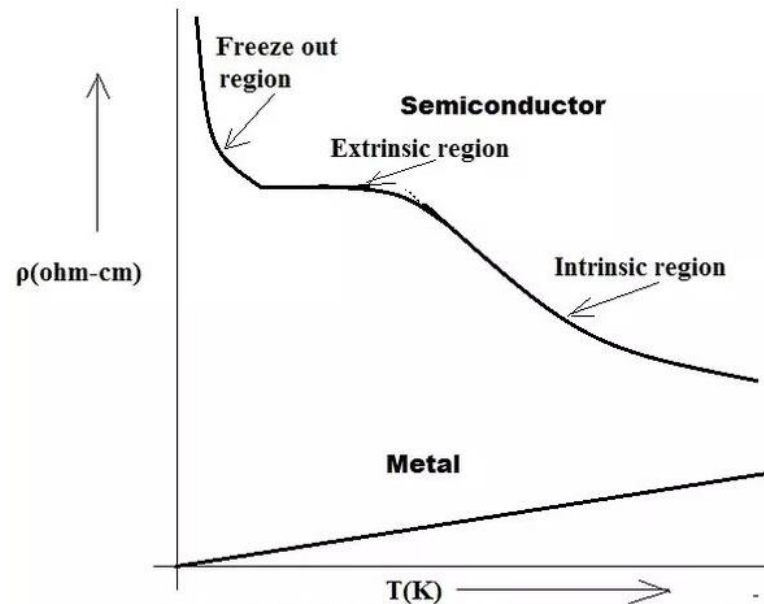
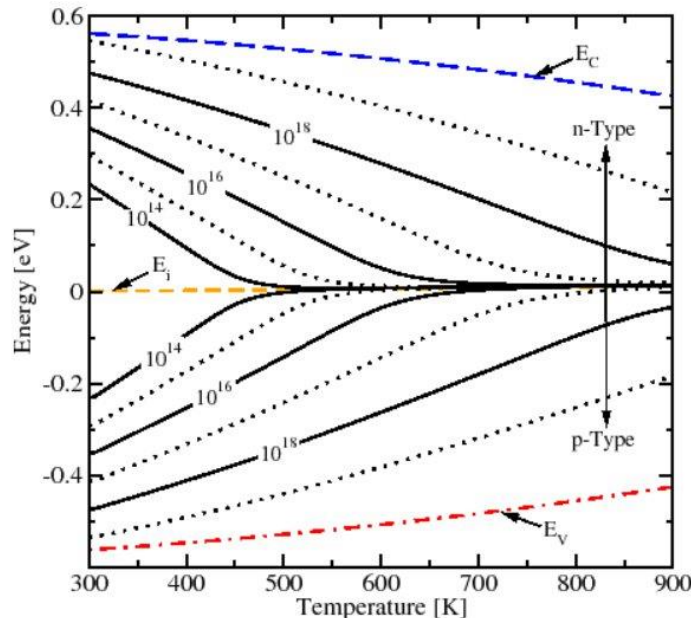


Domieszki vs temperatura



- Ilość nośników elektronowych i dziurowych w przybliżeniu rozkładem Boltzmanna:

$$n_e \approx n \left(\sqrt{\frac{kT}{E_f}} \right)^3 e^{\left((E_f - E_C) / 2kT \right)} \quad n_h \approx n \left(\sqrt{\frac{kT}{E_f}} \right)^3 e^{\left((E_V - E_f) / 2kT \right)}$$



Podsumowanie



- Rozmycie obsadzeń wokół energii Fermiego zależy wykładniczo od temperatury.
- Rozmycie obsadzeń wokół energii Fermiego nie ma większego znaczenia w metalach, ale bardzo silnie wpływa na przewodność w półprzewodnikach
- Szerokość przerwy wzbronionej determinuje takie własności jak przewodnictwo elektryczne, cieplne oraz własności optyczne.
- Przez domieszkowanie (kontrolowane wprowadzanie defektów) można zwiększyć ilość nośników
- Domieszkowanie pozwala wytworzenie dwóch rodzajów nośników: n i p .
A także na przesunięcie energii Fermiego w górę lub w dół pasma wzbronionego.