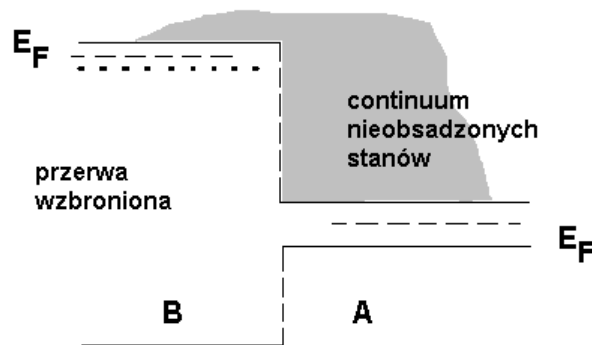


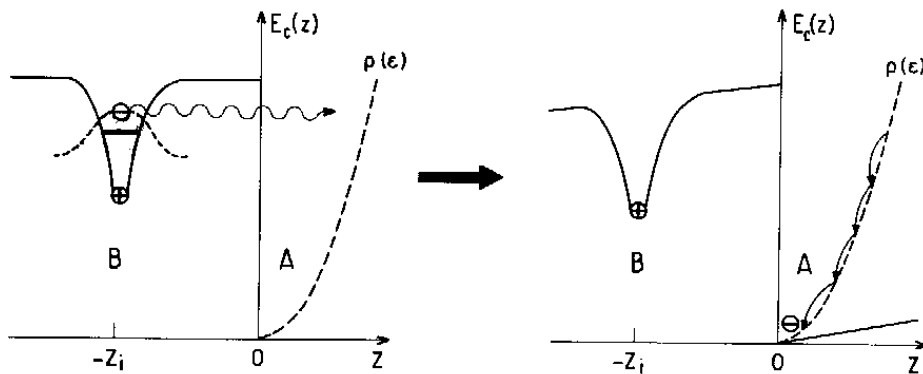
Heterozłącze domieszkowane w barierze

Półprzewodnik szerokoprzerwowy na złączu nazywamy BARIERĄ

- Domieszki donorowe –
jony sztywno związane w sieci
elektrony kwazi-swobodne ($T > 0$) lub płytko związane ($T \approx 0$)
- Równowaga termodynamiczna wymaga wyrównania poziomu Fermiego (nawet w $T = 0$)



nawet w $T = 0$ dyfuzja elektronów do obszaru A



przepływ lub tunelowanie zachodzi tak długo, aż wyrówna się poziom Fermiego (określony w A i B przez obszary dalekie od złącza)

- w B pozostaje warstwa dodatnio naładowanych zjonizowanych donorów (źródło bariery potencjału dla elektronów)
- w A kwaziswobodne elektrony gromadzą się w pobliżu złącza

Pole dodatnio naładowanej warstwy (powierzchniowa gęstość ładunku σ)

$$E = 2\pi\sigma$$

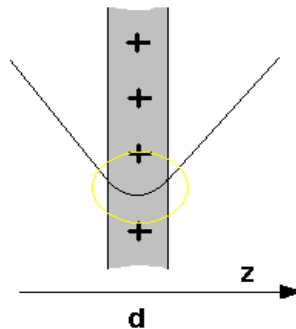
(zwrócone od płaszczyzny)

potencjał elektryczny w punkcie oddalonym o z od pow. Warstwy

$$V = -\int_0^z E dz = -Ez = (\text{dla } e^-) = Ez$$

(energia potencjalna)

dla jednorodnie naładowanej warstwy o grubości „ d ”
zależność wewnątrz warstwy jest kwadratowa

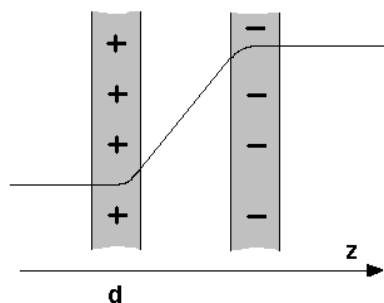


rozważmy dwie naładowane powierzchnie

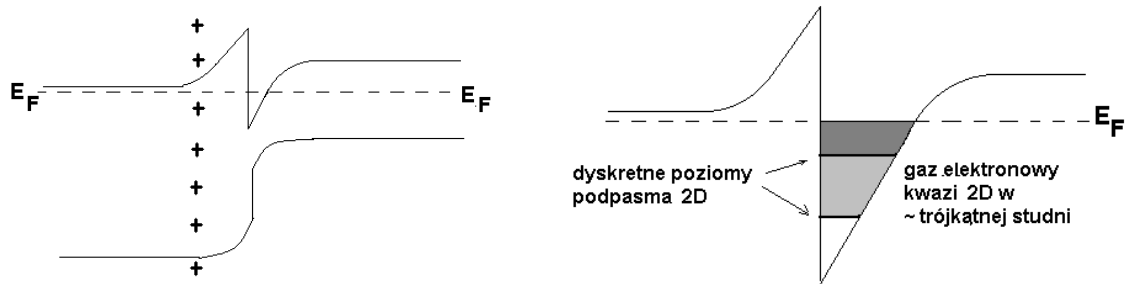
dno pasma stanowi potencjał $= 0$ dla kwaziswobodnych elektronów o energiach bliskich E_g (licząc zero energii w szczycie pasma walencyjnego)

- offset brzegów pasm jest wielkością charakterystyczną dla pary materiałów

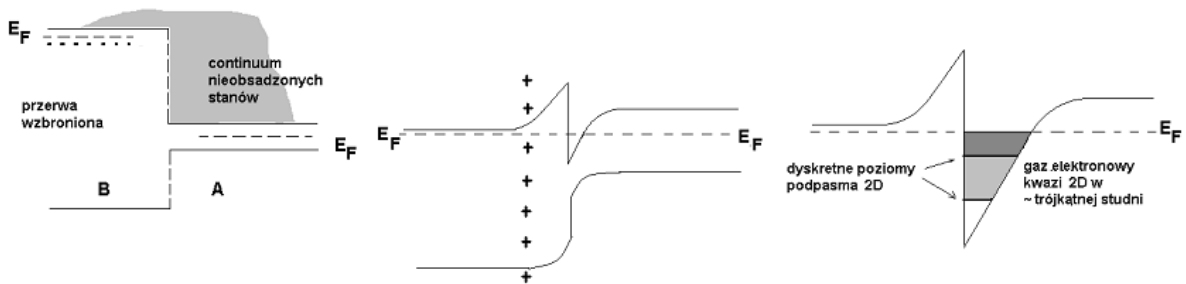
pole elektryczne pochodzące od rozwarstwowanego ładunku (różnica potencjałów) wbudowuje się w obszar złącza



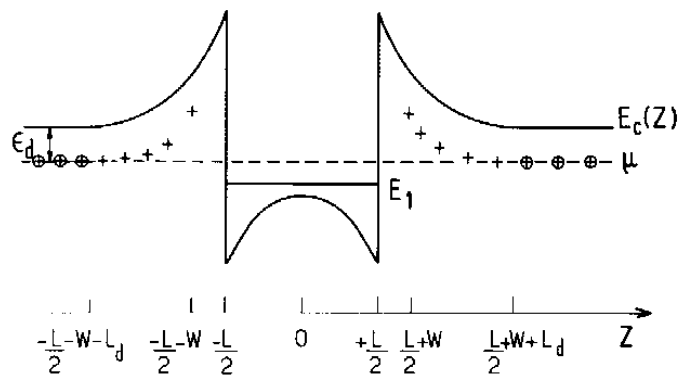
powstaje skok potencjału (na poziomie potencjału próżni)



powtórzmy



przypadek studni kwantowej symetrycznie domieszkowanej w barierach



kilka innych sytuacji:

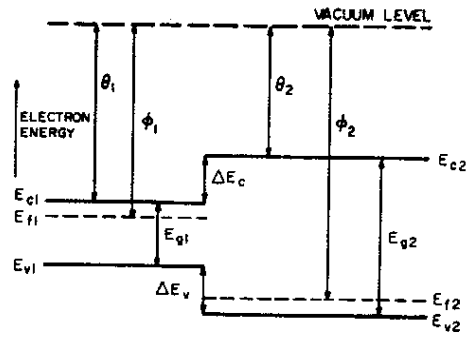


FIG. 1. Energy-band diagram for two isolated semiconductors in which space-charge neutrality is assumed to exist in every region.

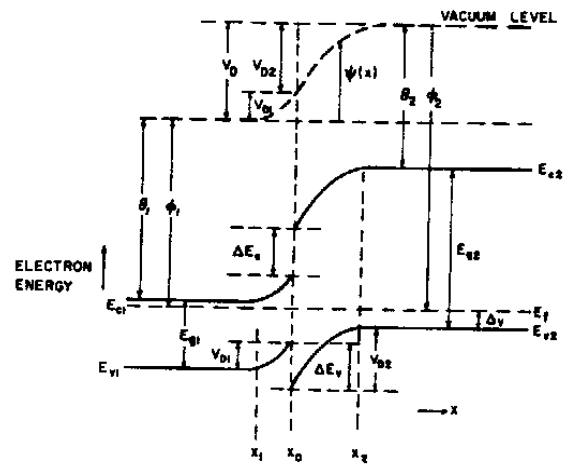
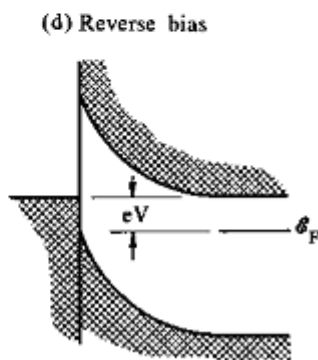
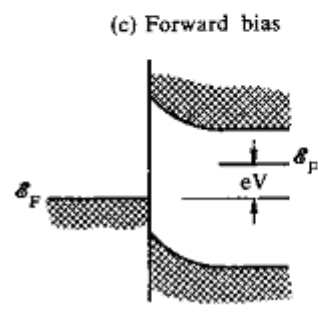
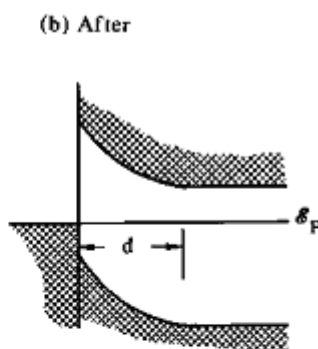
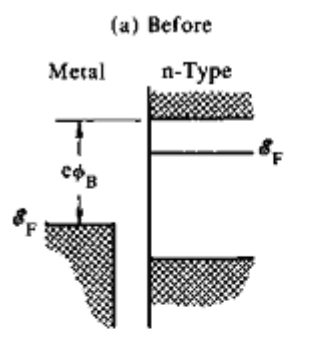
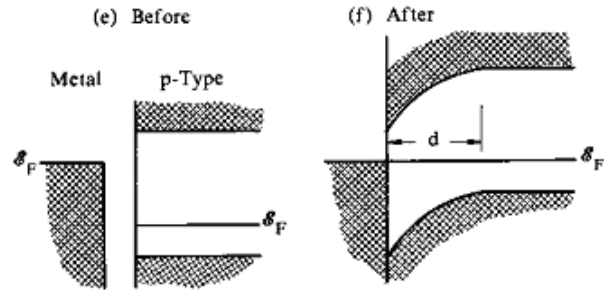
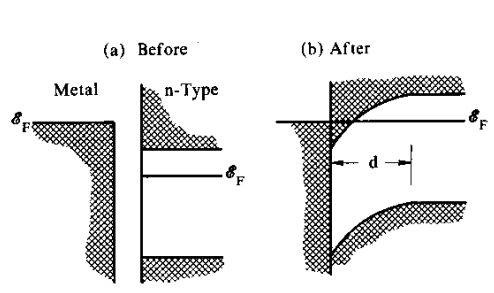


FIG. 2. Energy-band diagram of n-p heterojunction at equilibrium.

kontakt omowy i inne sytuacje



Kwantowe struktury półprzewodnikowe – - fizyka materii w nanoskali

Kwantowe struktury półprzewodnikowe:

struktury półprzewodnikowe (złożone z jednego lub kilku różnych materiałów półprzewodnikowych), w których z powodu zaburzenia symetrii translacyjnej (periodyczności) w jednym lub w kilku kierunkach przestrzennych dochodzi do częściowej lub całkowitej dyskretyzacji widma energii (w pewnym zakresie energii pasm) co prowadzi do kwantowego charakteru obserwowanych w nich (tych strukturach) zjawisk fizycznych (widma optyczne, transport ładunku, itp)

zaburzenie periodyczności - celowe – w procesie fabrykacji struktur

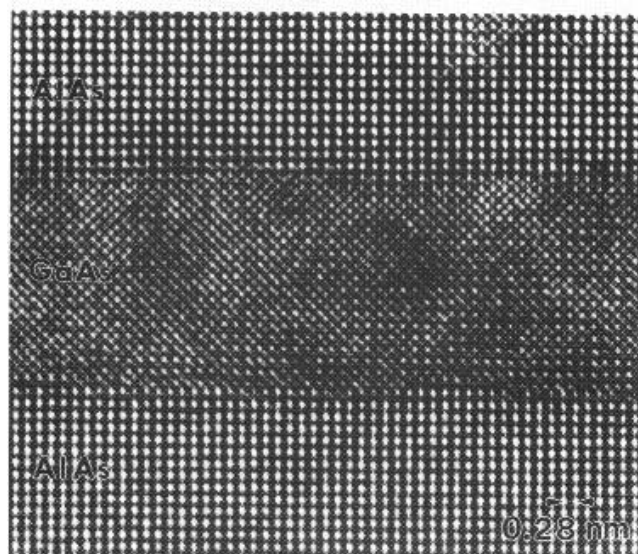
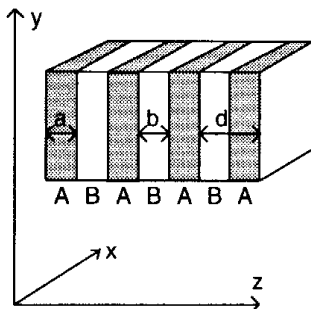
najbardziej ogólny podział:

- Struktury 2-wymiarowe (2D):
otrzymywane z układów 3D przez zaburzenie symetrii translacyjnej w jednym kierunku przestrzennym

rozmiary poprzeczne – makroskopowe (> mikrometra)

rozmiary w kierunku zaburzonej symetrii transl. – mezo-nano

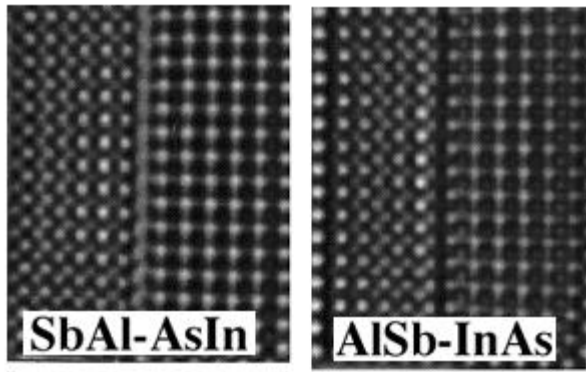
Studnie kwantowe i układy wielu barier



Kierunek z - dowolny krystalograficzny kierunek wzrostu, np. dla sieci w typie regularnym: (001) lub (111), rzadziej kierunki prostopadłe do płaszczyzn o wysokich indeksach...

taka sama struktura krystaliczna – inne atomy, inne stałe sieci

Wysokiej rozdzielczości obraz podwójnego heterozłącza AlAs/GaAs wykonany techniką TEM



- Struktury 1-wymiarowe: **druty kwantowe**
zaburzenie symetrii translacyjnej w 2 kierunkach przestrzennych (ale też np. nanorurki węglowe)
- Struktury 0-wymiarowe (0D):
kropki kwantowe
nanokrystaliny (nanokryształy)
wyspy kulombowskie

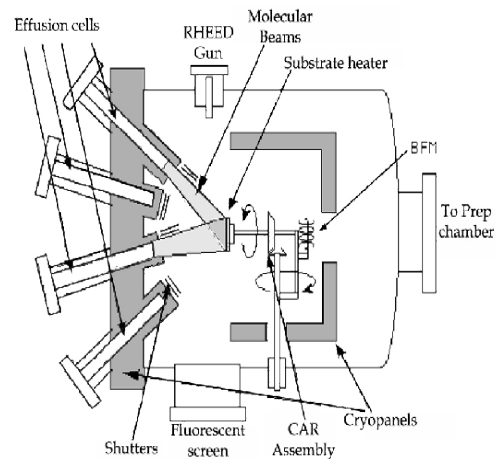
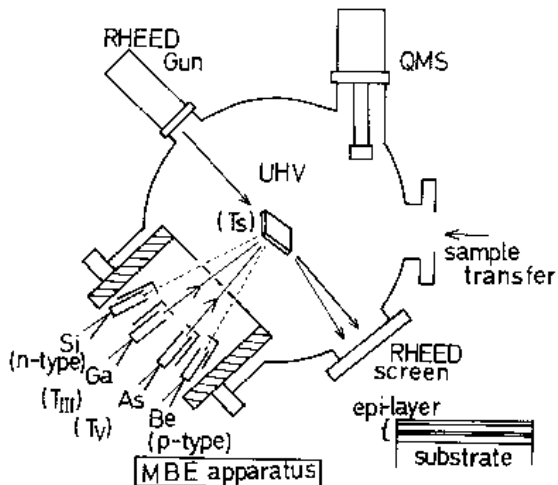
Wymiarowość struktur =
wymiar gazu kwaziswobodnych elektronów =
ilość niezaburzonych wymiarów przestrzennych

Techniki nakładania warstw

- Epitaksja z wiązek molekularnych (MBE)
molecular beam epitaxy
- MOPVE (MO epitaksja z fazy gazowej)
metalo-organic phase vapor epitaxy

- CVD, MOCVD (chemiczne osadzanie z fazy gazowej)
tu – ciśnienia normalne lub podwyższone, wzrost odbywa się przez reakcje na powierzchni metalo-organicznych reagentów

MBE



Parametry

Wysoka próżnia: 10^{-6} - 10^{-8} tora

Temperatury: 10^2 - 10^3 K (dokł. 0.1 K)

Czasy otwierania przesłon z dokł. $< 10^{-1}$ s

MBE – szybkość wzrostu $1\mu\text{m} / \text{h} \sim 1\text{ML} / \text{s}$

heteroepitaksja - podłoże o innej str. kryst. (inny kryształ)

Homoepitaksja - podłoże o identycznej str. kryst.

- bezdefektowe, epitaksjalne nakładanie warstw możliwe tylko dla struktur krystalizujących w tych samych sieciach i o podobnych stałych sieciowych ***a***

Taki proces nakładania „dopasowanych sieciowo” warstw nazywa się „**wzrostem pseudomorficznym**”

- **Podstawowe grupy kryształów złożonych**

III-V : GaAs, InAs, AlAs, InP

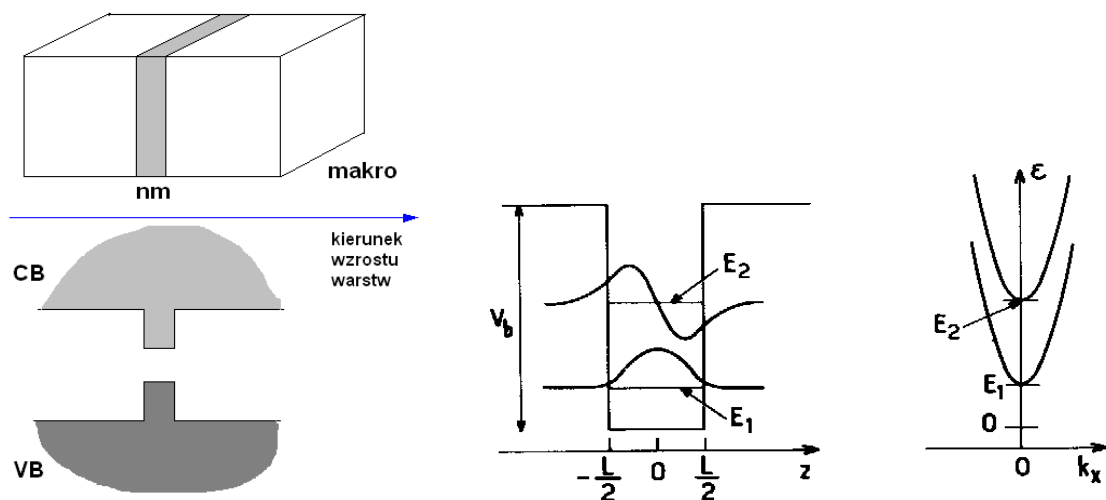
II-VI : ZnS, CdS, CdSe, HgS, ZnSe

Kryształują podobnie jak C, Ge, Si (IV)

Struktura blendy cynkowej (diamentu) lub wurcytu

Wiązanie kowalencyjne:

Studnia kwantowa – cienka (nanometry) warstwa materiału o wąskiej przerwie pomiędzy makroskopowymi ($> \mu\text{m}$) warstwami półprzewodnika o szerokiej przerwie energii wzbronionych (*)



elektron traktowany jest jak swobodna cząstka o masie m^* (*przybliżenie masy efektywnej*), dla której potencjałem ograniczającym ruch w kier. Z są różnice położenia brzegów pasm

studnia kwantowa (szczególnie niesymetryczna) nazywana jest czasami podwójnym heterozłączeniem

Teoria

Struktura energetyczna

równanie, które opisuje takie cząstki (wynika z przybliżenia masy efektywnej i tzw. przybliżenia funkcji obwiedni)

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m_{(i)}^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + E^{(i)}(0) + \frac{\hbar^2}{2m_{(i)}^*} k_t^2 - E \right) f(z) = 0$$

funkcja falowa ma postać: f. Blocha w 2D (x,y) x funkcja obwiedni

$$F(\vec{r}) = e^{ik_t \rho} f(z)$$

funkcja obwiedni jest rozwiązaniem zagadnienia jednowymiarowej studni potencjału (*), która powstaje z połączeń (na skali energii) brzegów pasma (tu przewodnictwa) idąc w kierunku wzrostu warstw

równanie (x) **przypomina** równanie Schrödingera dla cząstki o **zmieniającej się masie (w różnych obszarach) w jednym wymiarze i studni potencjału o skończonej głębokości;**

$E^{(i)}$ – energie den pasm (CB) dla kolejnych warstw

$$K_t = (k_x, k_y), \quad \rho = (x, y)$$

Każdy poziom energetyczny (i) w studni 1D jest dnem **PODPASMA**

o 2-wymiarowej relacji dyspersyjnej $E_i(k_t)$